

Schwangerschaft und Fliegen -
Patho-Physiologische Überlegungen und Richtlinien der Airlines

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Anne Marie Gräfin von Schwerin

aus
München

Jahr
2008

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. med. R. Knitza
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. J. Kleinschmidt
Dekan:	Prof. Dr. med. Dr. h.c. M. Reiser, FACR
Tag der mündlichen Prüfung:	27.11.2008

Für Marie

Vorwort

Für die Betreuung meiner Arbeit im Bereich Gynäkologie möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Reinhold Knitza meinen besonderen Dank aussprechen. Seiner fachlichen Kreativität und seinem besonderen Interesse an flugmedizinischen Fragestellungen habe ich das Thema meiner Arbeit zu verdanken. Für seine Bereitschaft mir während des Verlaufs meiner gesamten Arbeit zu jedem Zeitpunkt mit seinem umfassenden Fachwissen und seiner Zeit für fachliche Diskussionen zu Verfügung zu stehen, sei Herrn Prof. Dr. med. Reinhold Knitza nochmals herzlich gedankt.

Eine Arbeit ähnlich dieser, ist nie das Ergebnis der Bemühungen eines Einzelnen, sondern das Resultat der Mitwirkung Vieler. Daher möchte ich desweiteren denjenigen danken, die wesentlich zum Gelingen beigetragen haben.

Gräfelfing, im Februar 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Fragestellung	1
2	Patho-Physiologische Grundlagen zu	3
2.1	Atmosphäre	3
2.1.1	Struktur der Atmosphäre	3
2.1.2	Die Gasgesetze	4
2.1.3	Standardatmosphäre und Luftdruck	7
2.1.4	Zusammensetzung der Atmosphäre	8
2.2	Atmung	10
2.2.1	Die Ventilation	10
2.2.2	Pulmonaler Gasaustausch	13
2.2.3	Lungenperfusion	17
2.2.4	Arterialisierung des Blutes in der Lunge	18
2.3	Sauerstofftransport	19
2.3.1	Hämoglobin	19
2.3.2	O ₂ -Bindungskurve des Erwachsenen	20
2.3.3	O ₂ -Bindungskurve des Feten	24
2.4	Höhenexposition	26
2.4.1	Höhenzonen	26
2.4.2	Höhenumstellung	27
2.4.3	Höhenakklimatisation	29
2.4.4	Höhenexposition in der Schwangerschaft	30
2.5	Fliegen in der Schwangerschaft	32
2.5.1	Allgemeine Richtlinien der Airlines	32
2.5.2	Private Flugreisen	36
2.5.3	Fliegen als berufliche Tätigkeit	41
2.5.4	Medizinische Transporte	42
2.5.5	Auswirkungen auf den Feten	43
2.5.6	Beeinflussung der Schwangerschaft durch Fliegen	44
2.5.7	Notfälle an Bord eines Flugzeuges	45
2.5.8	Reiseplanung	46
2.5.9	Versicherungsschutz bei Auslandsreisen	47
2.6	Hypoxie	49
2.6.1	Ursachen und Arten der Hypoxie	49
2.6.2	Hypoxiewirkungen	50
2.6.3	Anzeichen und Symptome	53
2.6.4	Hypoxietoleranz	53

2.6.5	Behandlung	54
2.6.6	Hyperoxie	55
2.7	Strahlung	56
2.7.1	Strahlenexposition	56
2.7.2	Biologische Auswirkungen	59
3	Ergebnisse	61
4	Diskussion	63
5	Zusammenfassung	68
6	Anhang	69
7	Literatur	71

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol Bedeutung

<i>IATA</i>	International Air Transport Association
<i>ICAO</i>	International Civil Aviation Organization
<i>ISA0</i>	Internationale Standardatmosphäre
<i>P</i>	Luftdruck [<i>mbar</i>]
<i>V</i>	Volumen des Gases [<i>cm</i> ³]
<i>M</i>	Masse des Gases [<i>g</i>]
<i>R_m</i>	spezifische Gaskonstante (für trockene Luft: 2,8704 [$\frac{J}{kg \cdot K}$])
<i>T</i>	Temperatur [<i>K</i>]
<i>V_K</i>	Vitalkapazität [$\frac{l}{m}$]
<i>KG</i>	Körpergröße [<i>m</i>]
ρ	Dichte
\dot{M}	Diffusionsstrom
<i>F</i>	Fläche
<i>d</i>	Dicke
ΔC	Konzentrationsdifferenz
ΔP	Krogh-Diffusionskoeffizient
<i>S_{pO₂}</i>	Sauerstoff-Sättigung [%]
<i>P_{aO₂}</i>	arterieller <i>O₂</i> -Partialdruck [mmHg]
<i>P_{O₂}</i>	<i>O₂</i> -Partialdruck [mmHg]
<i>P_{CO₂}</i>	<i>CO₂</i> -Partialdruck [mmHg]
<i>ATPS</i>	Ambient Temperature Pressure, Saturated
<i>BTPS</i>	Body Temperature Pressure, Saturated
<i>STPD</i>	Standard Temperature Pressure, Dry
<i>V_A</i>	Alveoläre Ventilation [<i>l/min</i>]
<i>HbA</i>	Adultes Hämoglobin
<i>HbF</i>	Fetales Hämoglobin
<i>Hb</i>	Hämoglobin
<i>Hk</i>	Hämatokrit
<i>SSW</i>	Schwangerschaftswoche
<i>HF</i>	Herzfrequenz [Schläge/Minute]
<i>mSv</i>	Strahlendosis [MilliSievert]

1 Einleitung und Fragestellung

Die Mobilität der Bevölkerung nimmt stetig zu. So reisen jedes Jahr rund zwei Milliarden Menschen mit dem Flugzeug, darunter eine wachsende Anzahl Schwangerer.

Bis heute gibt es weder auf internationaler noch auf nationaler Ebene verbindliche Richtlinien der Fluggesellschaften zur Beförderung schwangerer Passagiere. Je nach Fluggesellschaft gelten für schwangere Flugreisende fast ausnahmslos zeitliche Beförderungsbeschränkungen. Die deutschen Fluggesellschaften befördern werdende Mütter größtenteils maximal bis zur 35. bzw. 37. Schwangerschaftswoche. Die Attestpflicht stellt sich sehr unterschiedlich, zwischen nicht gegeben und zeitlich reglementiert, dar.

In den letzten Jahren hat das Wissen um Umweltbedingungen und physiologische Anpassungsmechanismen in Bezug auf große Höhen stark zugenommen. Der Schwerpunkt aktueller Untersuchungen liegt zum einen auf der Veränderung allgemeiner Druckverhältnisse innerhalb und außerhalb des Flugzeuges in Kombination mit den physiologischen Veränderungen einer Schwangerschaft. Zum anderen auf den Auswirkungen veränderter Sauerstoffverfügbarkeit in großen Höhen, verbunden mit der Frage nach gesundheitlichen Risiken für Mutter und Feten. Kabinenflugzeuge verfügen zum Ausgleich atmosphärischer Verhältnisse über eine Druckkabine. Hier wird künstlich ein Innendruck erzeugt, der einer Höhe von 1.500 bis 2.500 m entspricht. Der mit zunehmender Höhe sinkende Luft- und Sauerstoffpartialdruck wird über den Druckausgleich im Kabinenflugzeug auf Werten gehalten, bei denen gesunde Personen über eine ausreichende Sauerstoffversorgung verfügen. Im Mittel liegt die Sauerstoffsättigung in üblicher Reiseflughöhe zwischen 10.000 und 12.000 m bei 93% [28]. Gesunde Schwangere reagieren auf Höhenexposition mit physiologischen Anpassungsmechanismen. Mit Kenntnis physiologischer Werte der Sauerstoffsättigung beim Feten kann während der gesamten Schwangerschaft eine höhenbedingte Gefährdung durch Hypoxie bei Flügen der zivilen Luftfahrt mit Druckkabine ausgeschlossen werden.

Äußere Faktoren wie psychischer Stress, Lärm oder Vibration bei Flugreisen erhöhen laut Literatur das Risiko für Schwangerschaftskomplikationen wie beispielsweise Frühgeburten oder vaginale Blutungen nicht [20]. Das „fetale Outcome“ ist im Vergleich zu nicht-flugreisenden schwangeren Passagieren nicht verschlechtert. Die Strahlenexposition weist je nach Flugroute und Fluglänge deutliche Unterschiede auf. Beispielsweise ist sie bei Langstreckenflügen mit Flugroute über die Pole gegenüber Kurzstreckenflügen deutlich erhöht [17]. Laut Literatur ist die Strahlenexposition für gelegentlich fliegende schwangere Passagiere in der zivilen Luftfahrt im Hinblick auf

Schwangerschaftskomplikationen bei gewöhnlichen Konstellationen des Sonnensystems vernachlässigbar [4].

Die Entscheidung für eine Flugreise in der Schwangerschaft ist eine individuell zu treffende. Sie ist unter Berücksichtigung des aktuellen Gesundheitszustandes sowie eventueller Vorerkrankungen aus Sicht der Schwangeren und ihrer behandelnden Ärzte abzuwägen. Aus medizinischer Sicht sind gelegentliche Flugreisen für gesunde Schwangere mit komplikationslosem Schwangerschaftsverlauf ohne zeitliche Einschränkung möglich [12,42]. Es ist jedoch als sinnvoll zu erachten, bis zum Abschluß der Organogenese in der 12. Schwangerschaftswoche nur notwendige Flugreisen zu unternehmen.

Vor dem Hintergrund der pathophysiologischen Kenntnisse zu Flugreisen in der Schwangerschaft gilt es, die unterschiedlichen Richtlinien der Fluggesellschaften aufzuzeigen und deren Sinnhaftigkeit zu hinterfragen.

Um Transparenz und Sicherheit für schwangere Passagiere und Fluggesellschaften zu erreichen, ist eine Neuerung und Vereinheitlichung der teilweise schon seit einigen Jahrzehnten bestehenden divergenten Beförderungsbestimmungen auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse wünschenswert.

2 Patho-Physiologische Grundlagen zu

2.1 Atmosphäre

2.1.1 Struktur der Atmosphäre

Unabhängig von der Methode, nach welcher die atmosphärischen Zonen charakterisiert werden, hängt die Höhe der jeweiligen Zone von geographischer Breite, Tageszyklus und Jahreszeit ab. Üblicherweise werden die atmosphärischen Zonen nach der jeweiligen Temperatur eingeteilt. Von der Erdoberfläche aus gesehen werden die Zonen in Tropo-, Strato-, Meso-, Thermo- und Exosphäre benannt. Am Ende jeder -sphäre befindet sich eine -pause [16].

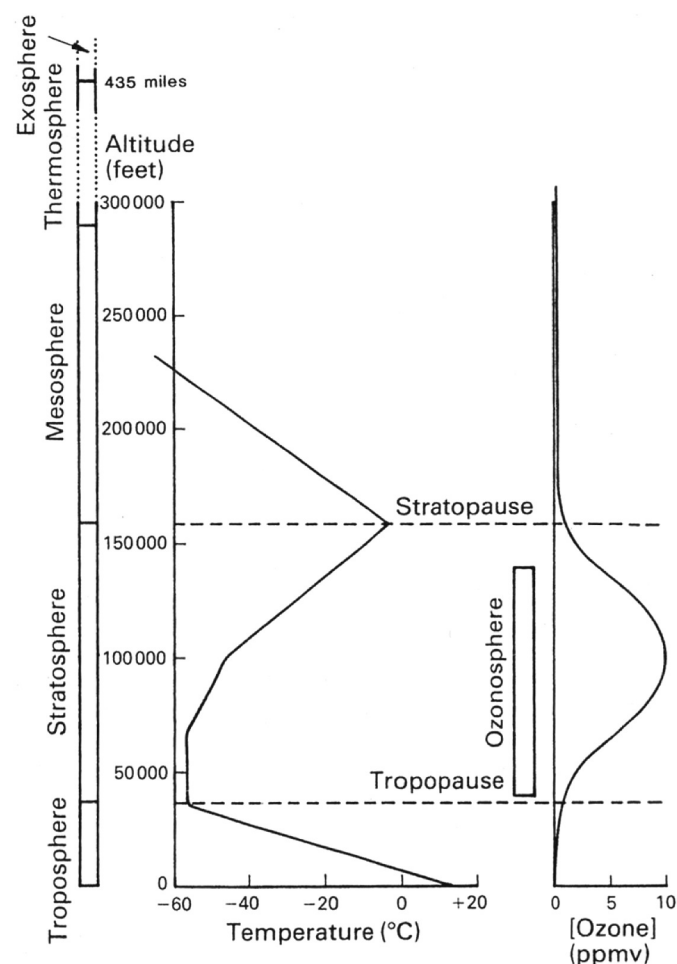


Abbildung 2.1: Aufbau der Atmosphäre [n. 16]

So kommt nach der Troposphäre beispielsweise die Tropopause. Die Troposphäre ist diejenige Schicht der Atmosphäre, die an die Erdoberfläche grenzt und in der sich

Wettergeschehen und menschliches Leben abspielen. Sie ist charakterisiert durch konstant sinkende Temperatur bei zunehmender Höhe. Die obere Grenze der Troposphäre, die Tropopause, beträgt am Äquator eine Höhe von 17 km und nimmt über den Regionen der Pole auf 6 bis 8 km ab. Die Stratosphäre weist im unteren Teil eine isotherme Schicht bei $-56,5^{\circ}\text{C}$ auf. Nach langsamem Anstieg im unteren Bereich der Stratosphäre folgt ein zügiger Temperaturanstieg bis auf -3°C [16]. Im Gegensatz zur Troposphäre ist die Stratosphäre über den Polen am dicksten, am Äquator hingegen am dünnsten. In dieser Region ist der höchste Anteil an Ozon messbar, welches nahe der Stratopause seine höchste Konzentration erreicht. Die Absorption ultravioletter Strahlung von Ozon wird für den beständigen Temperaturanstieg in der Stratosphäre verantwortlich gemacht. In der Mesosphäre fällt die Temperatur zügig mit zunehmender Höhe. Die Mesopause liegt in ungefähr 85 km Höhe und ist charakterisiert durch die geringste atmosphärische Temperatur. Die Thermosphäre als oberste Schicht der Atmosphäre zeichnet sich abhängig von der Sonnenaktivität durch konstante Temperaturerhöhung aus, bis sie in der Thermopause konstant bleibt. Mit der Exosphäre beginnt der Weltraum. Diese isotherme Schicht reicht bis tief in den Weltraum hinein [16].

2.1.2 Die Gasgesetze

In der Physik unterscheidet man zwei verschiedene Arten von Gasen, die sich durch unterschiedliche Eigenschaften beschreiben lassen und verschiedenen Gesetzmäßigkeiten gehorchen. Einerseits sind dies die idealen Gase, andererseits die realen Gase.

Ideale Gase

Ein ideales Gas liegt genau dann vor, wenn die Moleküle kurzzeitig zusammenstossen, dabei aber keine Kräfte aufeinander ausüben. Der Zusammenhang zwischen dem Druck p und dem Volumen V eines Gases lässt sich auf diese Weise bei konstanter Temperatur beschreiben. Die quantitative Beziehung zwischen Volumen und Druck wurde so erstmals von Robert Boyle (1627-1691) im Jahre 1662 und von Edmé Mariotte (1620-1684) im Jahre 1676 beschrieben. Das Boyle-Mariotte-Gesetz gilt für das Verhalten von Gasen bei konstanter Temperatur. Es besagt, dass bei konstanter Temperatur das Volumen eines Gases dem Druck umgekehrt proportional ist.

Der Einfluß von Temperaturänderungen auf Volumen und Druck eines Gases wurde von Jacques Charles (1746-1823) im Jahre 1787 und Joseph Gay-Lussac (1778-1850) im Jahre 1802 untersucht. Er stellte fest, dass eine Temperaturerhöhung um 1°C bei

konstantem Druck eine Volumenzunahme um $1/273,15\text{ K}$ des Wertes bei 0°C bedeutet. Damit wird der Volumenausdehnungskoeffizient γ beschrieben.

$$\gamma = \frac{1}{273,15\text{ K}} = \frac{1}{T_0} \quad (2.1)$$

Die Abhängigkeit von Volumen und Temperatur eines Gases ergibt eine Gerade und besagt, dass das Volumen eines eingeschlossenen Gases der absoluten Temperatur proportional ist, solange der Druck nicht verändert wird.

$$\frac{V}{T} = \text{konstant} \quad (2.2)$$

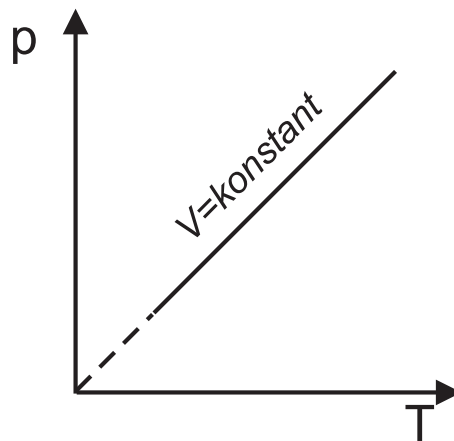


Abbildung 2.2: 2. Gesetz von Gay-Lussac

Aus der Zusammenfassung der Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac lässt sich die Zustandsgleichung eines idealen Gases entwickeln, auf deren Herleitung an dieser Stelle verzichtet wird.

$$pV = \nu RT = \text{konstant} \quad (2.3)$$

Auch die Gasdichte ist vom jeweiligen Zustand (Druck und Temperatur) abhängig. Durch Umformen von Gleichung 2.3 erhält man zur Berechnung der Dichte idealer Gase folgende Gleichung:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2.4)$$

Das Gasgesetz nach Dalton (1766-1844) von 1801 besagt, dass sich in einem Gasgemisch die Teil- und Partialdrücke der einzelnen Gase zum Gesamtdruck der Gas Mischung addieren.

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (2.5)$$

Dabei bestimmt der relative Anteil des einzelnen Gases am Gesamtvolumen des Gasgemisches den Partialdruck. Der Partialdruck eines Gases errechnet sich aus der Multiplikation seines Anteils am Gasgemisch (in Vol %/100) mit dem Gesamtdruck.

2.1.3 Standardatmosphäre und Luftdruck

Mit Beginn der Luftfahrt entstand die Notwendigkeit, Höhe, Luftdruck- und Temperaturschwankungen zu normieren. Dies bildete die Basis zur Kalibrierung von Fluginstrumenten für den genauen Vergleich verschiedener Flugzeuge bzw. Flugsysteme. Die erste international akzeptierte Standardatmosphäre wurde 1924 eingeführt. Es folgten mehrere nationale und internationale Standards, bis 1964 von der International Civil Aviation Organization (ICAO) die meist gebrauchte Internationale Standardatmosphäre (ISA) festgelegt wurde. Die ICAO ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen, die Standards für den zivilen Luftverkehr eingeführt hat. Sie wurde 1944 gegründet. Ihr Sitz ist in Montréal. Ihr gehören 190 Vertragsstaaten an. Deutschland ist permanent vertreten. Als Normalatmosphäre wird trockene, saubere, sich als ideales Gas verhaltende Luft vorausgesetzt. Die Berechnungen basieren auf festgelegten Standardwerten (Luftdruck, Temperatur, Dichte, Erdbeschleunigung) für die Erdatmosphäre in Meereshöhe. Die mittleren Druck- und Temperaturwerte entsprechen annähernd den Werten am 45. nördlichen Breitengrad [17].

Höhe [m]	Luftdruck [mmHg]	O ₂ -Partialdruck [mmHg]		O ₂ -Sättigung des Hämoglobins [%]
		Luft	alveolar	
0	760	160	103	97
914	681	143	89	
1.524	632	132	81	95
2.134	586	123	79	93
2.438	565	118	69	
3.048	523	110	61	90
3.658	483	101	54	86
4.572	429	90	45	80
5.486	380	80	38	72
6.096	349	73	34	67
6.706	321	67	33	65
7.620	282	59	30	60
9.144	228			
12.192	141			
15.240	87			
19.812	42			

Abbildung 2.3: Internationale Standardatmosphäre - ISA [17]

Die Standardatmosphäre gibt bei festgesetzten Werten für Temperatur und Breitengrad Auskunft über den durchschnittlich gemessenen atmosphärischen Druck. So wurde beispielsweise der Standardluftdruck auf Meereshöhe bei 15°C auf dem 45. Breitengrad auf 760 mmHg festgesetzt [17]. Mit zunehmender Höhe sinken Temperatur und Luftdruck. Entsprechend dazu sinkt der O₂-Partialdruck und damit auch

die O_2 -Sättigung des Hämoglobins. Das Eigengewicht der Lufthülle erzeugt in der Luft einen Druck, der mit zunehmendem Abstand von der Erdoberfläche kleiner wird. Nimmt man für verschiedene Höhen gleiche Temperaturen an, so nimmt der Luftdruck bei zunehmender Höhe nach einer Exponentialfunktion ab.

Die barometrische Höhenformel beschreibt allgemein den Luftdruck in Abhängigkeit der Höhe und lautet in ihrer allgemeinen Form:

$$dp = -g\rho(h)dh \quad (2.6)$$

Für ideale Gase und $T=\text{const.}$ ergibt sich die barometrische Höhenformel zu

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{g}{RT}h} \quad (2.7)$$

Bei genauen Luftdruckmessungen muss beachtet werden, dass die Temperatur mit der Höhe abnimmt. Mit den vereinfachenden Annahmen für $p_n = 1.013,25 \text{ hPa}$, was dem Druck im Jahresmittel in Meereshöhe entspricht, und der Temperatur 15°C (Temperatur im Jahresmittel in Meereshöhe), gilt für Höhen bis zu 11.000 m (Troposphäre) die internationale Höhenformel.

$$p_h = 1013 \text{ hPa} \left(1 - \frac{6,5h}{288 \text{ km}}\right)^{5,255} \quad (2.8)$$

und

$$\rho_h = 1,2255 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(1 - \frac{6,5h}{288 \text{ km}}\right)^{4,255} \quad (2.9)$$

Zu beachten ist bei der internationalen Höhenformel allerdings, dass der Luftdruck orts-, temperatur- und wetterabhängig ist.

2.1.4 Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Atmosphäre erstreckt sich von der Erdoberfläche bis zu einer nicht genau definierten Grenze in einer Höhe von 500 - 700 km. Diese variable Grenze wird von zwei gegenteiligen Faktoren bestimmt. Die Wärmestrahlung der Sonne bewirkt einerseits eine Ausweitung von Gasen der äußeren Atmosphäre in das umgebende Vakuum des Weltalls. Die Erdanziehungskraft sorgt andererseits für einen Rückzug der Gase in Richtung Erdoberfläche [16].

Mit zunehmender Höhe, von der Erdoberfläche aus gesehen, fallen die Dichte der Atmosphäre sowie der von ihr ausgehende Druck. Auf Meereshöhe wird laut Standardatmosphäre von einem atmosphärischen Druck von 760 mmHg ausgegangen. Dieser Druck halbiert sich auf 380 mmHg in einer Höhe von 18.000 feet (5.487 m) und verringert sich auf ein viertel (190 mmHg) in einer Höhe von 33.700 feet (10.273 m). Die Dichte des Gases ist vom jeweiligen Zustand (Druck und Temperatur) abhängig [16].

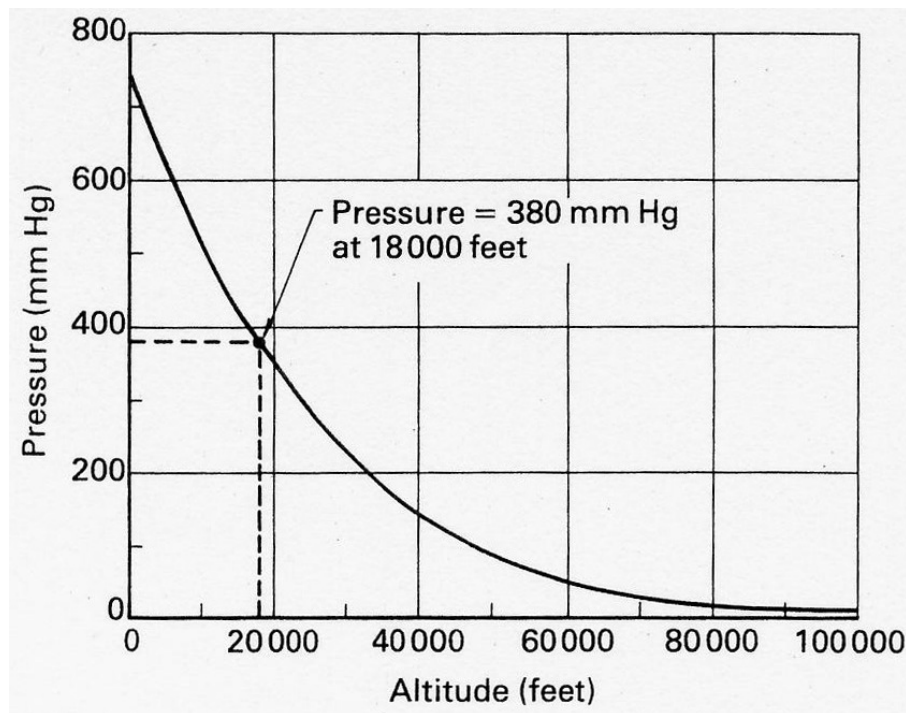


Abbildung 2.4: Höhe - Luftdruck [16]

Auch die Temperatur der Atmosphäre ändert sich je nach Höhe. Zudem gibt es für jede definierte Höhe jahreszeitliche und geographische Abhängigkeiten der Temperatur. Die Zusammensetzung der Atmosphäre ist aufgrund der Durchwirbelung der Luft zwischen der Erdoberfläche und einer Höhe von ungefähr 11 km relativ konstant. Die Luft - angegeben in Vol % - setzt sich in diesem Höhenbereich zusammen aus: 78,08 N_2 , 20,95 O_2 , 0,93 Argon, 0,03 CO_2 und 0,01 Edelgasen [17]. Diese Werte gelten für trockene und saubere Luft. Unmittelbar an der Erdoberfläche können diese Werte durch Umwelteinflüsse verändert sein. In einer Höhe oberhalb 100 km dissoziiert der Sauerstoff aufgrund der hohen Intensität ultravioletter Strahlung. Ab 300 km Höhe beginnt die Dissoziation des molekularen Stickstoffs, bis 4.000 km Höhe sind atomarer Stickstoff und Sauerstoff vorhanden. Der Anteil des Sauerstoffs nimmt stetig ab, bis es ab 9.000 km Höhe nur noch Wasserstoff und Helium gibt. In etwa 20.000 km Höhe existiert nur noch Wasserstoff [14].

2.2 Atmung

2.2.1 Die Ventilation

O_2 und CO_2 -Transport

Hauptaufgabe der Lungen ist die Atmung. Zusätzlich erfüllt die Lunge metabolische Aufgaben. Sie wandelt beispielsweise Angiotensin I in Angiotensin II um und entfernt Stoffe wie Serotonin aus der Blutbahn. Der Lungenkreislauf dient zudem als Puffer für das Blutvolumen und fängt kleine Gerinnsel aus dem venösen Körperkreislauf ab, bevor sie in der arteriellen Strombahn zu Schäden führen können.

Allgemein bedeutet Atmung Gasaustausch zwischen Organismus und Umwelt. Hauptfunktion der Atmung ist der Transport von Sauerstoff zu den Körperzellen und die Abgabe von Kohlendioxid nach außen. O_2 gelangt mit der Atemluft durch die Atmungsbewegungen in die Alveolen der Lunge, diffundiert von dort ins Blut, das den Transport des Sauerstoffs zum Gewebe ermöglicht, wo O_2 aus dem Blut zu den Mitochondrien im Inneren der zu versorgenden Zelle diffundiert. Das dort entstandene CO_2 geht den umgekehrten Weg.

Die Atmung kann in zwei Teilprozesse untergliedert werden. Die äußere Atmung umfasst Ventilation und alveoläre Diffusion. Als innere Atmung bezeichnet man den Gastransport zu und von den Zellen.

Der Atemgastransport innerhalb des Körpers erfolgt teils durch Konvektion, teils durch Diffusion. Konvektive Prozesse sorgen bei der Ventilation und im Blutkreislauf für den Transport von Gasmolekülen über größere Distanzen. Diffusion überbrückt kurze Strecken unter einem Millimeter im Bereich der Lungenalveolen und in den versorgten Geweben. Durch Diffusion ist es möglich, die Atemgase Sauerstoff und Kohlendioxid in den Blutkreislauf ein- bzw. auszuschleusen. Der Sauerstofftransport erfolgt aus der Umgebung zum Sauerstoffverbrauch in den Zellen über vier Teilprozesse; der Abtransport von CO_2 analog in umgekehrter Reihenfolge [47]:

- Konvektion zu den Lungenalveolen durch Ventilation
- Diffusion von den Alveolen zum Lungenkapillarblut
- Konvektion zu den Gewebekapillaren durch den Blutkreislauf
- Diffusion von den Gewebekapillaren zu den umgebenden Zellen

Funktion der Atemwege

Das Atemwegssystem ist in die luftleitenden und die gasaustauschenden Regionen unterteilt. Neben dem Austausch von Frischluft und Alveolarluft dient das Atemwegssystem auch der Reinigung, Erwärmung und Befeuchtung der Inspirationsluft. Der Übergang der Atemgase von der Gasphase in die flüssige Phase des Kapillarblutes erfolgt in den Alveolen. Etwa 300 Millionen Alveolen sitzen an den Endaufzweigungen des Bronchialbaums. Ihr Durchmesser beträgt ungefähr 0,3 mm. Sie sind umgeben von einem dichten Netz aus Lungenkapillaren [47]. Der Gasaustausch erfolgt hier durch Diffusion. Die beiden wichtigen Voraussetzungen für günstige Diffusionsbedingungen, große Oberfläche und kurze Diffusionsstrecke, sind mit einer alveolären Gesamtoberfläche von etwa 80 m^2 und einer alveolokapillären Membran von weniger als einem μm Dicke gegeben [47]. Die innere Oberfläche der Alveolen ist von Surfactant, einem von Pneumozyten II produzierten Phospholipidfilm, ausgekleidet, der zur Herabsetzung der Oberflächenspannung in den Alveolen dient.

Lungenvolumina und -kapazitäten

Die Ventilation ist abhängig von Atemzugvolumen (Tiefe des Atemzuges) und Atemfrequenz (Anzahl der Atemzüge pro Zeiteinheit). Für beide Größen gelten erhebliche Variationsbreiten.

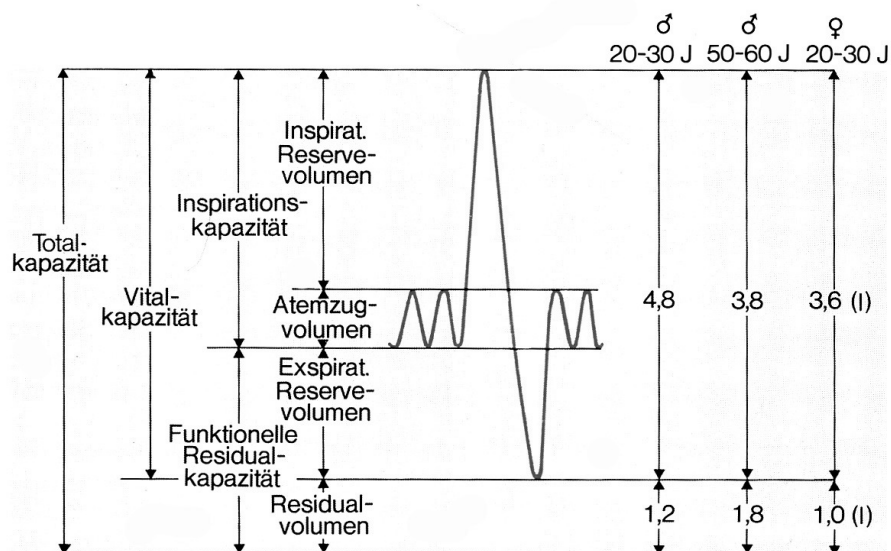


Abbildung 2.5: Lungenvolumina und -kapazitäten [47]

Zur quantitativen Erfassung der Atemverhältnisse in der Lunge wurden die folgenden Volumeneinteilungen gewählt. Die Zusammensetzung zwei oder mehrerer Volumina

wird als Kapazität bezeichnet.

Das Atemzugvolumen umfasst das normale inspiratorische bzw. expiratorische Volumen. Es liegt bei ungefähr 500 ml. Das Volumen, welches nach normaler Inspiration noch zusätzlich eingeatmet werden kann, wird als inspiratorisches Reservevolumen bezeichnet. Je nach Alter und Geschlecht liegt es zwischen 1.950 ml und 3.100 ml. Rund 1.200 ml können nach normaler Expiration noch zusätzlich ausgeatmet werden, das expiratorische Reservevolumen. Residualvolumen wird das Volumen bezeichnet, welches nach maximaler Expiration in der Lunge verbleibt. Es wird bei gesunden jungen Frauen mit 1.000 ml, bei gesunden jungen Männern mit 1.200 ml angegeben. Unter Vitalkapazität versteht man das Volumen, welches nach maximaler Inspiration maximal ausgeatmet werden kann. Es setzt sich aus Atemzugvolumen, inspiratorischem und expiratorischem Reservevolumen zusammen. Ein Normalwert lässt sich hierfür kaum angeben, da die Vitalkapazität von verschiedenen Parametern wie Alter, Geschlecht, Größe, Trainingszustand und Körperposition abhängig ist. Mit zunehmendem Alter nimmt aufgrund des Elastizitätsverlustes der Lunge und der zunehmenden Einschränkung der Thoraxbeweglichkeit die Vitalkapazität ab. Für Frauen gelten im Mittel Werte, die um 25 % geringer sind, als vergleichbare Werte beim Mann. Stehende Personen und Sportler in gutem Trainingszustand erreichen höhere Werte für die Vitalkapazität [47]. Als allgemeine Regel für den jungen gesunden Mann gilt:

$$VK = 2,5 \left[\frac{l}{m} \right] \cdot KG[m]$$

Damit lässt sich bei einer Körpergröße von 1,80 m eine Vitalkapazität von 4.500 ml errechnen. Die Inspirationskapazität beschreibt ein Volumen zwischen 2.400 ml und 3.600 ml, zusammengesetzt aus Atemzugvolumen und inspiratorischem Reservevolumen, welches nach normaler Expiration maximal eingeatmet werden kann. Die funktionelle Residualkapazität ist das Volumen aus expiratorischem Reservevolumen und Residualvolumen. Sie liegt zwischen 1.800 ml und 2.400 ml. Dieses Volumen bleibt nach normaler Expiration in der Lunge. Unter Totalkapazität versteht man die Summe der vier Lungenvolumina. Sie liegt im Mittel für Frauen bei 4.200 ml, für Männer bei 6.000 ml [47].

Mit Ausnahme von Residualvolumen und funktioneller Residualkapazität, können die ein- und ausgeatmeten Volumina direkt mit Spirometer oder Pneumotracheographen gemessen werden.

2.2.2 Pulmonaler Gasaustausch

Die alveolären Atemgasfraktionen

Die Alveolen enthalten ein alveoläres Gasgemisch aus O_2 und CO_2 . Die alveoläre Atemgasfraktion wird sowohl von den stoffwechselabhängigen Werten für die O_2 -Aufnahme bzw. CO_2 -Abgabe, als auch vom Ausmaß der alveolären Ventilation bestimmt. Im Allgemeinen werden O_2 -Aufnahme und CO_2 -Abgabe auf Standardbedingungen bezogen. Atemvolumina und Ventilationsgrößen werden auf die im Körper vorliegenden Bedingungen bezogen. Man kann hier STPD-Bedingungen, BTPS-Bedingungen und ATPS-Bedingungen voneinander unterscheiden. STPD-Bedingungen steht für Standard Temperature Pressure, Dry. Das sind die physikalischen Standardbedingungen, bei denen die Volumenangaben auf $T=273\text{ K}$, $P=760\text{ mmHg}$ und $P_{H_2O}=0\text{ mmHg}$ bezogen werden. Bei den BTPS-Bedingungen (Body Temperature Pressure, Saturated) handelt es sich um die in der Lunge herrschenden Bedingungen bei $T=273+37=310\text{ K}$, P variierend nach dem aktuellen Barometerdruck $P_B - P_{H_2O}=47\text{ mmHg}$. Die Wasserdampfsättigung liegt bei 37°C . Als ATPS-Bedingungen (Ambient Temperature Pressure, Saturated) bezeichnet man die aktuellen Meßbedingungen ausserhalb des Körpers. Hier gilt die Zimmertemperatur T , der aktuelle Barometerdruck P_B und die Wasserdampfsättigung. Eine Änderung der Bezugswerte für die Atemgasfraktionen verändert die Werte nur unwesentlich. So erhält man für die Ruheatmung für die alveoläre Ventilation unter BTPS-Bedingungen einen Wert von 5 l/min , unter STPD-Bedingungen einen Wert von $4,1\text{ l/min}$ unter Zugrundelegung eines mittleren Barometerdruckes von 760 mmHg auf Meereshöhe [41,47].

Für die alveolären Atemgasfraktionen Erwachsener unter Ruhebedingungen erhält man folgende auf Standardbedingungen bezogene Werte: eine mittlere O_2 -Aufnahme von $0,28\text{ l/min}$ und eine mittlere CO_2 -Abgabe von $0,23\text{ l/min}$. Das Verhältnis von CO_2 -Abgabe und O_2 -Aufnahme wird als respiratorischer Quotient bezeichnet und beträgt im Mittel $0,23/0,28=0,82$. Die alveoläre Ventilation beträgt $4,1\text{ l/min}$, die inspiratorische O_2 -Fraktion $0,209$ ($20,9\text{ Vol \%}$). Damit ergeben sich folgende Werte für die Zusammensetzung des alveolären Gasgemisches: für die alveoläre O_2 -Fraktion $0,14$ (14 Vol \%) und für die alveoläre CO_2 -Fraktion $0,056$ ($5,6\text{ Vol \%}$). Der verbleibende Rest besteht aus Stickstoff und einem sehr geringen Anteil an Edelgasen [47].

Partialdrücke der Atemgase

Partialdrücke in der atmosphärischen Luft

Nach dem Gesetz von Dalton übt jedes Gas in einem Gemisch einen Partialdruck (P_{Gas}) aus, der seinem Anteil am Gesamtvolumen (F_{Gas}) eines Gases entspricht. Es gilt

bei der Anwendung dieses Gesetzes auf die Atemgase zu berücksichtigen, dass atmosphärische Luft und alveoläres Gasgemisch neben O_2 , CO_2 , N_2 und Edelgasen auch Wasserdampf mit bestimmtem Partialdruck (P_{H_2O}) enthält. Da im Gesetz nach Dalton die Gasfraktionen für trockenes Gasgemisch angegeben sind, wird der Gesamtdruck P_B um den Wasserdampfdruck P_{H_2O} reduziert.

$$P_{Gas} = F_{Gas} \cdot (P_B - P_{H_2O}) \quad (2.10)$$

Unter Berücksichtigung der Werte für die atmosphärischen O_2 - und CO_2 - Fraktionen erhält man für die Partialdrücke der Inspirationsluft im Flachland für den O_2 -Partialdruck in etwa einen Wert von 150 mmHg und für den CO_2 -Partialdruck ungefähr 0,2 mmHg [47]. Mit zunehmender Höhe nehmen der O_2 und CO_2 -Partialdruck in der Inspirationsluft ab.

Partialdrücke im alveolären Gasgemisch

Die alveolären Partialdruckwerte lassen sich mit Hilfe der Alveolarformeln berechnen. Unter Zugrundelegung der Daten für die Ruheatmung im Flachland ergeben sich für gesunde Erwachsene ein alveolärer O_2 -Partialdruck von 100 mmHg und ein alveolärer CO_2 -Partialdruck von 40 mmHg. Diese Werte sind als zeitliche und örtliche ungefähre Mittelwerte zu verstehen und entstehen beispielsweise durch diskontinuierliches Einströmen der Frischluft in die Alveolen und ungleichmäßige Belüftung und Durchblutung der verschiedenen Lungenabschnitte. Vor allem sind die alveolären Partialdrücke von der alveolären Ventilation abhängig. Bei Hyperventilation steigt der alveoläre O_2 -Partialdruck, der alveoläre CO_2 -Partialdruck hingegen sinkt. Hypoventilation führt zu einem gegenteiligen Effekt (Abb. 2.6).

Das im Bereich der Alveolen ausgetauschte O_2 und CO_2 wird über das Blut transportiert, daher sind die Austauschraten an die Lungenperfusion gekoppelt.

Lungenperfusion, O_2 -Aufnahme und CO_2 -Abgabe sind direkt proportional zueinander. Zusammenfassend gilt, die alveolären O_2 - und CO_2 -Partialdrücke sind vom Verhältnis der alveolären Ventilation zur Lungenperfusion abhängig.

Das Ventilations-/Perfusionsverhältnis beträgt für einen lungengesunden Erwachsenen 0,8 - 1,0 [47].

O_2 - und CO_2 -Diffusion

In den Lungenkapillaren bestehen deutliche Partialdruckdifferenzen. Sie stellen die treibende Kraft für die O_2 - und CO_2 -Diffusion und damit für den pulmonalen Gasaustausch dar. In den Lungenalveolen beträgt der O_2 -Partialdruck 100 mmHg. Das

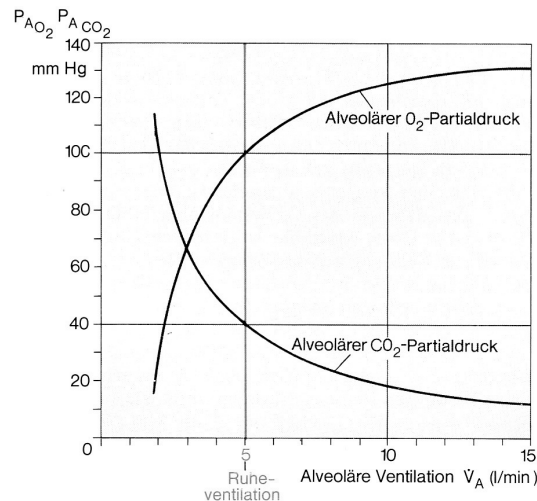


Abbildung 2.6: Alveoläre Partialdrücke in Abhängigkeit zur alveolären Ventilation [47]

in die Lungenkapillaren eintretende venöse Blut weist einen wesentlich niedrigeren O_2 -Partialdruck von 40 mmHg auf. Der CO_2 -Partialdruck hingegen beträgt am Anfang der Lungenkapillaren 46 mmHg um in den Alveolen auf 40 mmHg abzufallen [47].

Welche Zeit ein Stoff für die Diffusion benötigt, ist abhängig von der Art des diffundierenden Stoffes, der Diffusionsstrecke und der Diffusionsfläche. Nach dem 1. Fickschen Diffusionsgesetz ist der Diffusionsstrom \dot{M} , d.h. die Substanzmenge, die durch eine Schicht der Fläche F und der Dicke d hindurchtritt, direkt proportional zu der wirksamen Konzentrationsdifferenz ΔC .

$$\dot{M} = D \cdot \frac{F}{d} \cdot \Delta C \quad (2.11)$$

Der Diffusionskoeffizient D ist abhängig von Diffusionsmedium, Art der diffundierenden Teilchen und der Temperatur. Im Falle der Diffusion eines gelösten Gases durch eine Flüssigkeitsschicht kann die Konzentration C durch den Partialdruck P ersetzt werden, weil beide Werte zueinander proportional sind. Der Diffusionskoeffizient D wird durch den Proportionalitätsfaktor K ersetzt, der zur besseren Unterscheidung als Krogh-Diffusionskoeffizient bezeichnet wird.

$$\dot{M} = K \cdot \frac{F}{d} \cdot \Delta P \quad (2.12)$$

Für die Diffusionsmedien in der Lunge gilt, K_{CO_2} ist ungefähr 23mal größer als K_{O_2} . Unter gleichen Bedingungen diffundiert also ungefähr 23mal mehr CO_2 als O_2 durch eine definierte Schicht. Dies ist Grund für die Tatsache, dass in der Lunge trotz kleiner

CO_2 -Partialdruckdifferenzen eine ausreichende CO_2 -Abgabe durch Diffusion gesichert ist. Ein idealer Diffusionsprozeß ist gekennzeichnet durch eine große Austauschfläche F und einen kleinen Diffusionsweg d . Beide Voraussetzungen sind in der Lunge idealerweise gegeben. Die Alveolenoberfläche beträgt insgesamt etwa 80 m^2 , die Diffusionsstrecke liegt im Bereich einiger weniger μm .

Der größte Diffusionsweg liegt im Inneren des Erythrozyten. Zur Erleichterung der O_2 -Diffusion werden die O_2 -Moleküle von einem zusätzlichen Transportprozeß unterstützt. Nach Eintritt in den Erythrozyten werden die O_2 -Moleküle an Hämoglobin angelagert. Dabei entsteht Oxyhämoglobin. Die Oxyhämoglobin-Moleküle haben nun zusätzlich die Möglichkeit, in Richtung Zentrum des Erythrozyten zu wandern und so im Sinne einer „facilitated diffusion“ den O_2 -Transport zu beschleunigen. Sobald CO_2 aus seinen chemischen Bindungen gelöst ist, diffundiert es in entgegengesetzter Richtung aus dem Erythrozyten in den Alveolarraum.

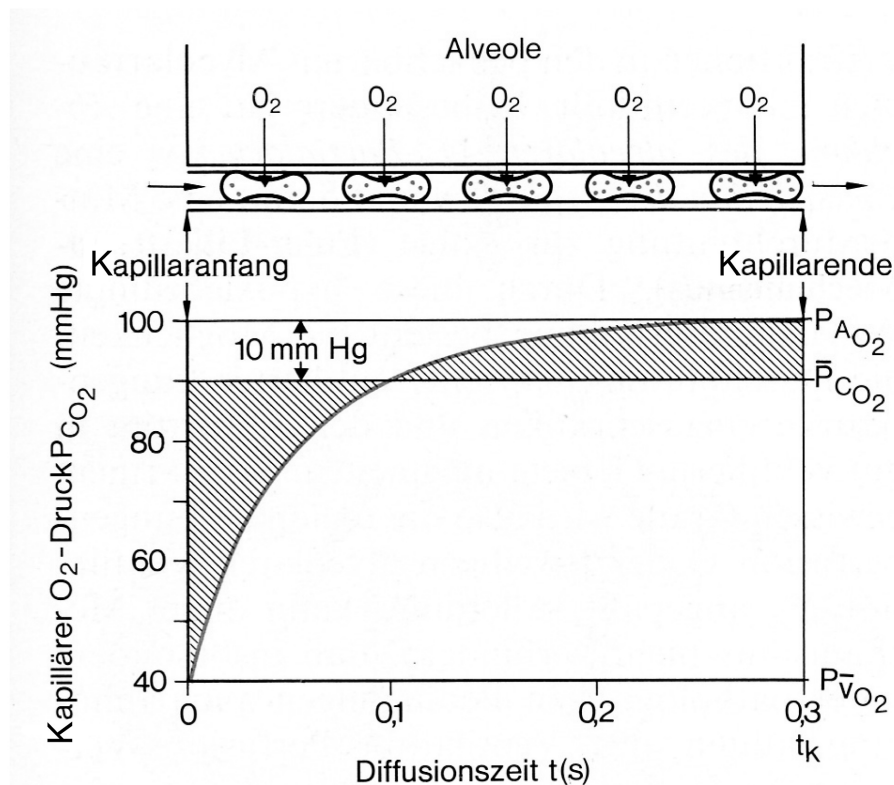


Abbildung 2.7: O_2 -Partialdruckzunahme im Erythrozyten während der Passage durch die Lungenkapillare [47]

Die Kontaktzeit des Erythrozyten, während der er bei seiner Passage durch die Lungenkapillare mit dem Alveolarraum in Verbindung steht, beträgt in etwa 0,3 Sekunden. Diese kurze Zeit genügt, um die Partialdrücke im Blut denen des Alveolarraums anzugleichen. Innerhalb von 0,1 Sekunden ändert sich der Sauerstoffpartialdruck im Blut der Lungenkapillare von 40 mmHg auf 90 mmHg. Im Verlauf von weiteren

0,2 Sekunden erreicht der Sauerstoffpartialdruck einen Wert von 100 mmHg und damit eine Angleichung an den alveolären Sauerstoffpartialdruck. Die Tatsache des zunächst schnellen und dann immer langsamer ansteigenden Sauerstoffpartialdruckes ergibt sich aus dem Fickschen Diffusionsgesetz. Anfangs besteht eine große Differenz zwischen O_2 -Partialdruck von Alveolarraum und Kapillare. Im Laufe der Passagezeit wird die O_2 -Partialdruckdifferenz immer kleiner. Dies führt zu einer Abnahme der Diffusionsrate. Während dieser Kontaktzeit gleicht sich der CO_2 -Partialdruck dem Wert innerhalb des Alveolarraums an. Er fällt von 46 mmHg auf 40 mmHg. Insgesamt lässt sich sagen, dass sich in der Lunge Gesunder die Partialdrücke im Blut denen des Alveolarraums nahezu vollständig angleichen [47].

2.2.3 Lungenperfusion

In Ruhe beträgt die Lungenperfusion 5-6 l/min, bei schwerer körperlicher Arbeit kann sie bis auf das 4fache zunehmen. Das Lungengefäßsystem hat im Vergleich zum Körperkreislauf einen sehr kleinen Strömungswiderstand. Die Lungenperfusion wird durch eine mittlere Druckdifferenz zwischen Pulmonalarterie und linkem Vorhof von 8 mmHg aufrechterhalten. Mit steigender Durchblutung reduziert sich der Strömungswiderstand druckpassiv durch Dilatation der Lungengefäße und durch Eröffnung von Reservekapillaren. Die Auslastung der Kapillaren unter Ruhebedingungen liegt bei 50 %. Mit steigender Belastung erhöht sich dieser Anteil. Damit nimmt die Oberfläche für den pulmonalen Gasaustausch und in Folge dessen die Diffusionskapazität zu. Dies ermöglicht eine Anpassung bzw. Steigerung der O_2 -Aufnahme und CO_2 -Abgabe, entsprechend veränderter Stoffwechselbedürfnisse. Die Lungenperfusion ist deutlich von regionalen Faktoren, hauptsächlich der Körperlage, abhängig. In aufrechter Körperposition sind die basalen Lungenpartien aufgrund der hydrostatischen Druckdifferenz zwischen den Gefäßregionen im Basis- bzw. Spitzenbereich wesentlich stärker durchblutet, als die Lungenspitzen. In den oberen Lungenpartien liegt der arterielle Druck unterhalb des alveolären Druckes, was die Kapillaren größtenteils kollabieren lässt. In den unteren Lungenpartien hingegen weisen die Lungenkapillaren ein weites Lumen auf, weil der Gefäßinnendruck den alveolären Druck übersteigt. Die Lungenperfusion nimmt aufgrund der regionalen Verteilung der Strömungswiderstände nahezu linear von der Lungenbasis bis zur Lungenspitze ab. Bei körperlicher Arbeit oder in liegender Position vermindern sich die regionalen Unterschiede bei der Lungenperfusion [47].

Die regionale Lungenperfusion wird auch durch die jeweiligen Atemgasfraktionen in den benachbarten Alveolarräumen mit beeinflusst. Kommt es zu einer hypoxiebedingten Abnahme des alveolären O_2 -Partialdruckes, führt dies zu einer Konstriktion der Arteriolen mit nachfolgender Minderdurchblutung (Euler-Lilijestrand-Mechanismus). Bis

zu einem gewissen Grad besteht durch diese hypoxiebedingte Widerstandserhöhung die Möglichkeit, die Durchblutung schlecht ventilierter Lungenbezirke zu Gunsten gut ventilierter Bezirke umzuverteilen. Bei Überschreitung einer gewissen Grenze oder unter pathologischen Bedingungen können Inhomogenitäten des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses nicht verhindert werden [47].

2.2.4 Arterialisierung des Blutes in der Lunge

Unter Arterialisierung des Blutes versteht man die durch den pulmonalen Gasaustausch erreichte Änderung der O_2 - und CO_2 -Partialdrücke. Der Grad der Arterialisierung ist hauptsächlich von den Verhältnissen der alveolären Ventilation, der Lungenperfusion und der Diffusionskapazität zueinander abhängig. Zudem beeinflussen regionale Inhomogenitäten von Ventilation, Perfusion und Diffusion die Arterialisierung des Blutes. Die für das Ventilations-Perfusions-Verhältnis vorhandenen regionalen Differenzen gehen hauptsächlich auf die inhomogene Verteilung der Lungendurchblutung zurück. So gilt für einen gesunden Erwachsenen in aufrechter Körperhaltung ein Ventilations-Perfusions-Verhältnis von 3 in der Lungenspitze bzw. von 0,65 in der Lungenbasis. In der Lungenspitze liegt der alveoläre O_2 -Partialdruck bei 131 mmHg und der alveoläre CO_2 -Partialdruck bei 29 mmHg. Für die Lungenbasis beträgt der O_2 -Partialdruck 89 mmHg und der CO_2 -Partialdruck 42 mmHg [47]. In Abhängigkeit vom Alter erhält man unterschiedliche Normwerte für den arteriell gemessenen O_2 -Partialdruck. Der mittlere arterielle O_2 -Partialdruck beträgt bei Jugendlichen 95 mmHg, bei 40-jährigen 80 mmHg und bei 80-jährigen 70 mmHg. Grund hierfür sind wahrscheinlich die mit dem Alter zunehmenden Verteilungsungleichmäßigkeiten in der Lunge. Im Gegensatz dazu liegt der mittlere arterielle CO_2 -Partialdruck von Jugendlichen bei 40 mmHg und bleibt mit zunehmendem Alter annähernd konstant [47].

2.3 Sauerstofftransport

2.3.1 Hämoglobin

Eine der wichtigsten Aufgaben des Blutes ist es, den über die Lunge aufgenommenen Sauerstoff zu den Organen und Geweben zu transportieren, und im Gegenzug das angefallene Kohlendioxid an die Lunge abzugeben. Dies ist Aufgabe des in den Erythrozyten enthaltenen Hämoglobins. Hämoglobin verfügt über die Fähigkeit, O_2 in den Lungenkapillaren anzulagern und in den Gewebekapillaren wieder abzugeben. Zudem kann Hämoglobin einen Teil des im Zellstoffwechsels entstandenen CO_2 in der Lunge wieder freisetzen.

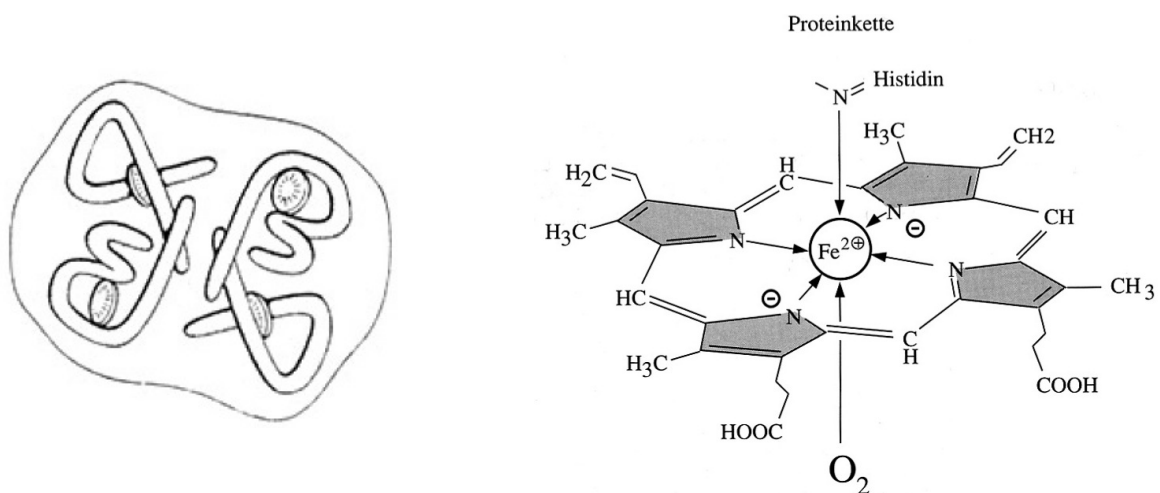


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung eines Hämoglobinmoleküls (li.) [51]; Struktur des Häm mit den zusätzlichen Liganden im Hämoglobin (re.) [44]

Hämoglobin ist ein Chromoprotein mit einem Molekulargewicht von 64.458 Dalton. Es besteht aus Globin (94 %) und der Eisen-II-haltigen prosthetischen Gruppe Häm (6 %). Das Hämoglobinmolekül ist aus 4 Peptidketten mit je einem Häm aufgebaut. Im normalen Hämoglobin sind je zwei Peptidketten identisch. Dies wird Primärstruktur genannt. HbA_1 ist mit ca. 96-98 % und HbA_2 mit 1-3 % vertreten. HbF ist beim Erwachsenen nur noch in Spuren vertreten. Entscheidend für die Funktion des Hämoglobins ist das zentral angeordnete Eisenatom. Durch seinen Einbau wird das Protoporphyrin zum Häm. Beim Sauerstofftransport wird O_2 ohne Änderung der Wertigkeit des Eisenatoms an das Häm angelagert. Dieser Vorgang, bei dem das Hämoglobin in Oxyhämoglobin übergeht, wird als Oxygenation bezeichnet [26].

Das Hämoglobin des Erwachsenen (HbA) verfügt über α -Ketten mit je 141 Aminosäuren und über β -Ketten mit je 146 Aminosäuren. Das fetale Hämoglobin (HbF) hat an Stelle der β -Ketten Polypeptide mit anderen Aminosäureverbindungen, die γ -Ketten.

HbF hat gegenüber HbA eine höhere Sauerstoffaffinität, das heißt, es nimmt bei niedrigerem PO_2 leichter Sauerstoff auf. HbF wird nach der Geburt kontinuierlich zu HbA umgebaut.

Hämoglobin ist einerseits für den Transport bzw. die Bindung des Sauerstoffs zuständig. Die Aufnahme erfolgt in der Lunge unter Bildung von Oxy-Hb, die Abgabe in den Kapillaren der Gewebe durch Dissoziation. Andererseits ist Hämoglobin an der pH-Regulation des Blutplasmas beteiligt, wobei Oxy-Hb ein größeres Basenbindungsvermögen als reduziertes Hb hat. Der Abbau des Hämoglobins erfolgt nach dem Untergang der Erythrozyten in den Zellen des Monozyten-Makrophagensystems. Eisen, das bei diesem Vorgang frei wird, findet weitgehend zur Neubildung von Hämoglobin Verwendung. Der Protoporphyrinring des Häm wird aufgespalten und über verschiedene Abbaustufen zu Bilirubin umgewandelt.

Die mittlere Hämoglobinkonzentration liegt bei Männern bei 150 g/l, bei Frauen bei 140 g/l, bei Neugeborenen beträgt sie ungefähr 200 g/l [47]. Sie ist einer erheblichen Schwankungsbreite unterworfen. Wie auch beim Feten kann man erhöhte Hämoglobinkonzentrationen bei Menschen finden, die sich über einen längeren Zeitraum in großen Höhen aufhalten. Hier handelt es sich um Anpassungsreaktionen, die trotz eines erniedrigten O_2 -Partialdruckes eine ausreichende O_2 -Versorgung sicherstellen sollen [47].

Eine Anämie liegt definitionsgemäß dann vor, wenn Hämoglobinkonzentration, Hämatokrit oder Erythrozytenzahl unter die Norm vermindert sind. Die Normwerte für Hämoglobin betragen bei Männern $> 13,5$ g/dl, bei Frauen $> 12,0$ g/dl. Die Werte für den Hämatokrit liegen bei Männern normalerweise bei > 40 %, bei Frauen > 30 %. Für die Anzahl der Erythrozyten sind es $> 4,3$ Mill./mcl bzw. $> 3,9$ Mill./mcl [26].

Der überwiegende Teil des mit dem Blut transportierten O_2 ist chemisch an Hämoglobin gebunden. Unter Berücksichtigung des Molekülaufbaus von Hämoglobin kommt man zu folgender Berechnung für die O_2 -Bindung an Hämoglobin. 1 mol Hämoglobin bindet maximal 4 mol O_2 . Rund 64.500g Hämoglobin binden $4 \times 22,4$ l (Molvolumen für ideale Gase) O_2 , das heißt 1g Hämoglobin bindet 1,39ml O_2 . Auch für diesen Wert gilt eine gewisse Schwankungsbreite, so dass man für praktische Zwecke angenommen hat: 1g Hb bindet 1,34ml O_2 . Dieser Wert wird als Hüfner'sche Zahl bezeichnet [47].

2.3.2 O_2 -Bindungskurve des Erwachsenen

Die Reaktion von O_2 und Hämoglobin folgt dem Massenwirkungsgesetz. Die Konzentration des gelösten O_2 ist nach dem Gesetz von Dalton proportional zum

O_2 -Partialdruck und bestimmt den Anteil des Hämoglobins, welches in Oxyhämoglobin überführt wird. Der Anteil des Oxyhämoglobins an der gesamten Hämoglobinkonzentration wird als O_2 -Sättigung bezeichnet und in % angegeben.

Die O_2 -Sättigung des Hämoglobins hängt nach dem Massenwirkungsgesetz vom jeweiligen O_2 -Partialdruck ab. Die O_2 -Bindungskurve des Hämoglobins verläuft charakteristischerweise s-förmig. Ihre Steilheit ist von verschiedenen Parametern abhängig und wird durch den O_2 -Halbsättigungswert gekennzeichnet. Das ist der O_2 -Partialdruck, bei dem die O_2 -Sättigung 50 % beträgt. Hier liegen 50 % des gesamten Hämoglobins als Oxyhämoglobin vor. Bei einem pH von 7,4 und einer Temperatur von 37°C im arteriellen Blut, beträgt der O_2 -Halbsättigungswert 26 mmHg [47].

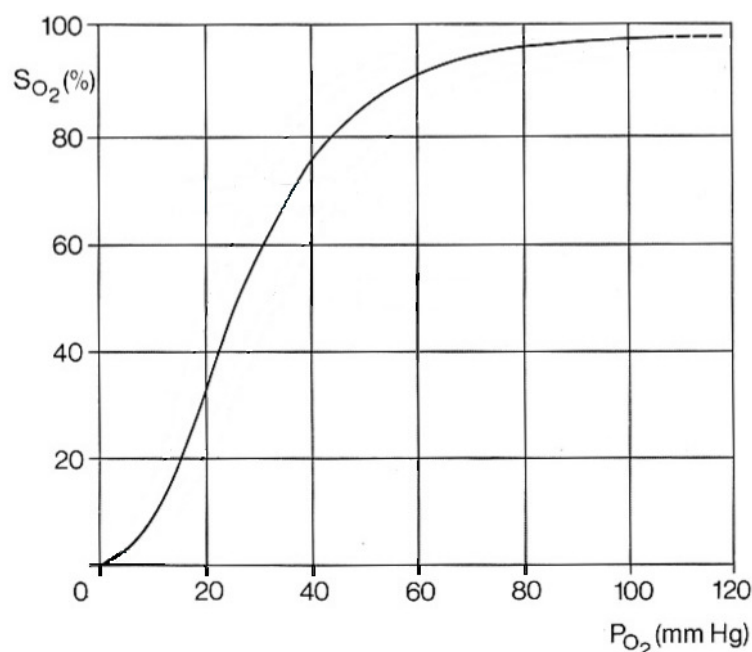


Abbildung 2.9: O_2 -Bindungskurve des Erwachsenen [n.47]

Der typische Verlauf der O_2 -Bindungskurve ist wesentliche Voraussetzung für die O_2 -Transportfunktion des Blutes. Wird O_2 über die Lunge aufgenommen, so gleicht sich der O_2 -Partialdruck des Blutes annähernd dem alveolären Partialdruck an. Ein gesunder Jugendlicher hat im Mittel einen arteriellen O_2 -Partialdruck von 95 mmHg bei einer O_2 -Sättigung von 97 % (Abb. 2.9). Sinkt der arterielle O_2 -Partialdruck aufgrund von Alter, Lungenfunktionsstörung oder Höhenexposition, ist der flache Verlauf der O_2 -Bindungskurve im Endteil von protektiver Bedeutung für die O_2 -Sättigung des Blutes.

So ist es zu erklären, dass die normalerweise auf Flügen der zivilen Luftfahrt herabgesetzten Werte für den O_2 -Partialdruck dennoch gut tolerable Werte für die O_2 -Sättigung

der Passagiere haben. Laut ISAO (Kap.2.3) erreicht die O_2 -Sättigung des Hämoglobins bei Innendruckausgleich in der Kabine entsprechend 2.134 m Höhe und inspiratorischem bzw. alveolärem O_2 -Partialdruck von 123 bzw. 79 mmHg einen nahezu normalen Wert von 93 %. Humphreys et al. [28] untersuchten in ihrer Arbeit 84 Passagiere im Alter von 1-78 Jahren, ohne Berücksichtigung von Vorerkrankungen, in Bezug auf die Änderungen der O_2 -Sättigung bei Flügen in der zivilen Luftfahrt. Sie kamen zu dem Schluß, dass bei allen Passagieren eine signifikante Änderung der O_2 -Sättigung zu verzeichnen war. Im Mittel konnte am Boden eine O_2 -Sättigung von 97 %, auf Reise Flughöhe eine mittlere O_2 -Sättigung von 93 % gemessen werden, wobei 54 % aller Passagiere auf Reise Flughöhe eine O_2 -Sättigung von 94 % oder Werten darunter aufwiesen, ohne sich hiervon beeinträchtigt zu fühlen.

Für die O_2 -Abgabe im Gewebe ist der steil verlaufende Mittelteil der O_2 -Bindungskurve deutlich von Vorteil. Im Gewebe ist es wichtig, ohne größere Schwankungen des O_2 -Partialdrucks die O_2 -Abgabe dem Bedarf anzupassen. Am venösen Kapillarende beträgt bei körperlicher Ruhe der O_2 -Partialdruck im Mittel 40 mmHg, damit liegt eine O_2 -Sättigung von 73 % vor. Sinkt der venöse O_2 -Verbrauch nur in geringem Maße um 5 mmHg, so sinkt die O_2 -Sättigung um 7 % und die entsprechende O_2 -Menge wird zusätzlich zur Verfügung gestellt [47].

Der O_2 -Gehalt des arteriellen und venösen Blutes lässt sich mit folgender Formel unter Berücksichtigung der Hüfner-Zahl und der obengenannten Werte für die arterielle und venöse O_2 -Sättigung berechnen:

$$[O_2] = 1,34 \cdot [Hb] \cdot S_{O_2} \cdot 10^{-5} \quad (2.13)$$

Für das arterielle Blut erhält man einen Gehalt von 0,20 O_2 /l Blut, für das venöse Blut errechnet sich ein Wert von 0,15 O_2 /l Blut [47].

Verlagerung der O_2 -Bindungskurve

Der charakteristische Verlauf der O_2 -Bindungskurve hängt größtenteils von der Reaktionsweise des Hämoglobins ab, kann aber von einigen anderen Faktoren, vor allem Temperatur, pH-Wert und CO_2 -Partialdruck zusätzlich beeinflusst werden. Der s-förmige Verlauf bleibt erhalten, während es zu einer Verlagerung der O_2 -Bindungskurve mit zunehmender oder abnehmender Steilheit kommen kann.

Der charakteristische Verlauf der O_2 -Bindungskurve liegt bei 37°C . Bei niedrigeren Temperaturen wird der Kurvenverlauf steiler und nach links verlagert, bei höheren Temperaturen flacher mit Verlagerung nach rechts.

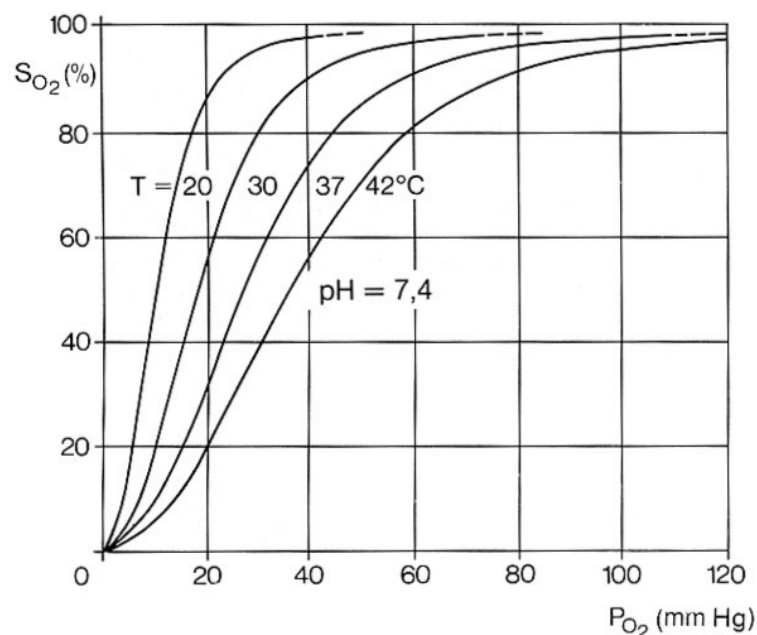


Abbildung 2.10: Abhängigkeit der O_2 -Bindungskurve von der Temperatur [n. 47]

Für die charakteristische O_2 -Bindungskurve wird von einem pH-Wert von 7,4 ausgegangen. Mit abnehmendem pH-Wert sinkt die O_2 -Affinität zum Hämoglobin. Für geringere pH-Werte zeigt sich eine flachere, nach rechts verlagerte O_2 -Bindungskurve, für höhere pH-Werte eine steilere nach links verlagerte O_2 -Bindungskurve. Die pH-Abhängigkeit des O_2 -Bindungskurvenverlaufes wird als Bohr-Effekt bezeichnet. Der pH-Wert und der CO_2 -Partialdruck stehen in enger Verbindung. Eine Zunahme des CO_2 -Partialdruckes geht mit einer pH-Abnahme einher. Mit einer Zunahme des CO_2 -Partialdruckes sinkt die O_2 -Affinität zum Hämoglobin, die O_2 -Bindungskurve wird flacher und ist nach rechts verlagert. Diese Abhängigkeit der O_2 -Bindungskurve vom CO_2 -Partialdruck wird als Bohr-Effekt bezeichnet. Der Bohr-Effekt erleichtert also einerseits die O_2 -Aufnahme in die Lunge und andererseits die O_2 -Abgabe an die Gewebe.

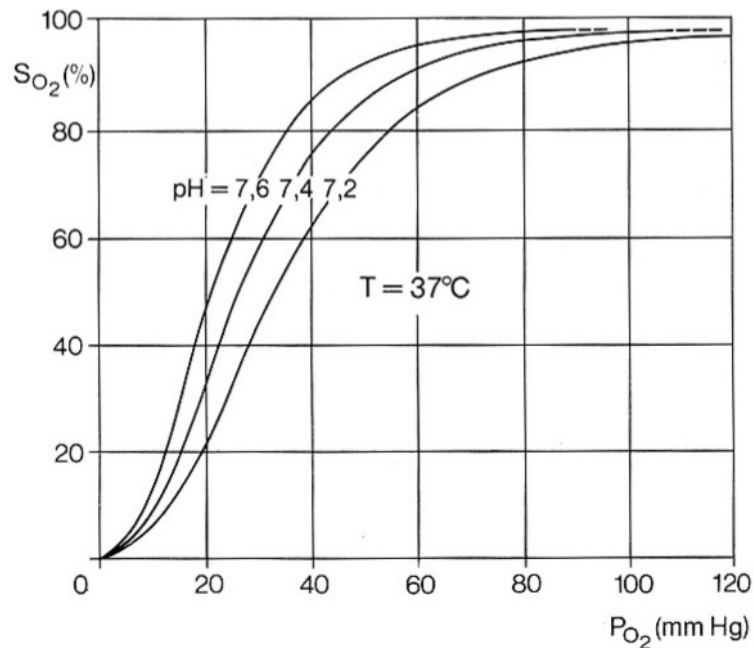


Abbildung 2.11: Abhängigkeit der O_2 -Bindungskurve vom pH-Wert [n. 47]

Zudem können bestimmte pathologische Umstände die O_2 -Transportbedingungen des Blutes verändern. Beispielsweise sind hier verschiedene Anämieformen, organische Phosphatverbindungen, vor allem das 2,3-Diphosphoglycerat und die Kationenkonzentration im Erythrozyten zu nennen. CO-Vergiftungen bedingen eine ausgeprägte Linksverlagerung der O_2 -Bindungskurve [47].

2.3.3 O_2 -Bindungskurve des Feten

Der Fet lebt physiologischerweise im Vergleich zum Erwachsenen bei wesentlich niedrigeren O_2 -Partialdruckwerten [16,25,42]. Damit ist auch die Bandbreite der Veränderung des O_2 -Partialdruckes beim Feten deutlich geringer, als bei Erwachsenen. So gilt für eine Abnahme des O_2 -Partialdruckes, wie dies beim Fliegen in großen Höhen der Fall ist, nur eine geringfügige Abnahme des O_2 -Partialdruckes beim Feten. Beispielsweise fällt der mütterliche alveoläre O_2 -Partialdruck von ca. 100 mmHg auf Meereshöhe auf 65 mmHg in 2.500m Höhe [16]. Der fetale O_2 -Partialdruck würde in gleichen Höhen von 30 mmHg auf 26 mmHg sinken, ohne dabei eine Mangelversorgung hervorzurufen [16,34]. Diese Werte basieren im Wesentlichen auf drei wichtigen physiologischen Tatsachen.

Primär hat das fetale Hämoglobin (HbF) eine andere Struktur, als das Hämoglobin des Erwachsenen. Die fetale O_2 -Bindungskurve verläuft im Vergleich zur mütterlichen O_2 -Bindungskurve bei gleichen Bedingungen deutlich steiler. Das bedeutet, dass bei

gleichem O_2 -Partialdruck das fetale Blut zwischen 20 % und 30 % mehr O_2 binden kann, als das mütterliche Blut [42].

Zum anderen liegt die mittlere fetale Hb-Konzentration um ca. 50 % höher, als die der Mutter. Die Hämoglobinkonzentration des mütterlichen Blutes liegt im Mittel bei 120 g/l, die des fetalen Blutes im Mittel bei 180 g/l, so dass bei gleichen O_2 -Partialdruckwerten der Fet mehr O_2 binden kann, als die Mutter.

Als dritter Punkt ist der Bohr-Effekt zu nennen, der für den plazentaren Gasaustausch von besonderer Bedeutung ist. Während des Diffusionskontaktes nimmt infolge des CO_2 -Austausches die O_2 -Affinität des mütterlichen Blutes ab. Gleichzeitig kommt es zu einer Erhöhung des fetalen O_2 -Bindungsbestrebens. Die O_2 -Austauschrate steigt.

So kann der Fet aufgrund seiner physiologischen Besonderheiten problemlos milde Hypoxien, wie sie auf üblichen Reiseflughöhen der zivilen Luftfahrt vorkommen, tolerieren, ohne Schaden zu nehmen.

Selten wird die Auffassung vertreten, dass eine Abnahme der O_2 -Sättigung im fetalen Blut Stimulus für Frühgeburtsbestrebungen sein könnte [42]. Von Huch et al. [27] durchgeführte Untersuchungen bei gesunden Schwangeren und ihren Feten auf Kurzstreckenflügen belegen eine ausreichende O_2 -Sättigung. Sie geben damit keinen Hinweis auf pathophysiologische Veränderungen weder bei den Müttern noch bei den Feten. Bei den Müttern kam es in dieser Untersuchung zu keinen zusätzlichen Uteruskontraktionen im Laufe sämtlicher überwachter Flüge. Die Frequenz sporadischer Kontraktionen entsprach der jeweiligen Schwangerschaftswoche. Zudem kam es in allen Flugphasen zu keiner signifikanten Änderung der fetalen Herzfrequenz. Der Fet toleriert laut mehreren Untersuchungen [5,12,19,27,36,39] problemlos Flughöhen zwischen 10.000 m und 12.000 m und die damit für ihn verbundene geringfügige Abnahme des O_2 -Partialdruckes sowie milde Hypoxie.

2.4 Höhenexposition

2.4.1 Höhenzonen

Mit zunehmender Höhe sinkt der O_2 -Partialdruck proportional zum abnehmenden Luftdruck (Kap. 2.1.3). Die O_2 -Verfügbarkeit nimmt ab, es kommt je nach Höhe zu einem unterschiedlichen Grad an Hypoxie. Der höhenbedingte O_2 -Mangel kann nach Wirkungsschwellen in vier Höhenzonen unterteilt werden. Diese sind als ungefähre Richtwerte zu sehen, deren Schwankungsbreite vom Grad der Akklimatisation und der individuellen Disposition abhängen.

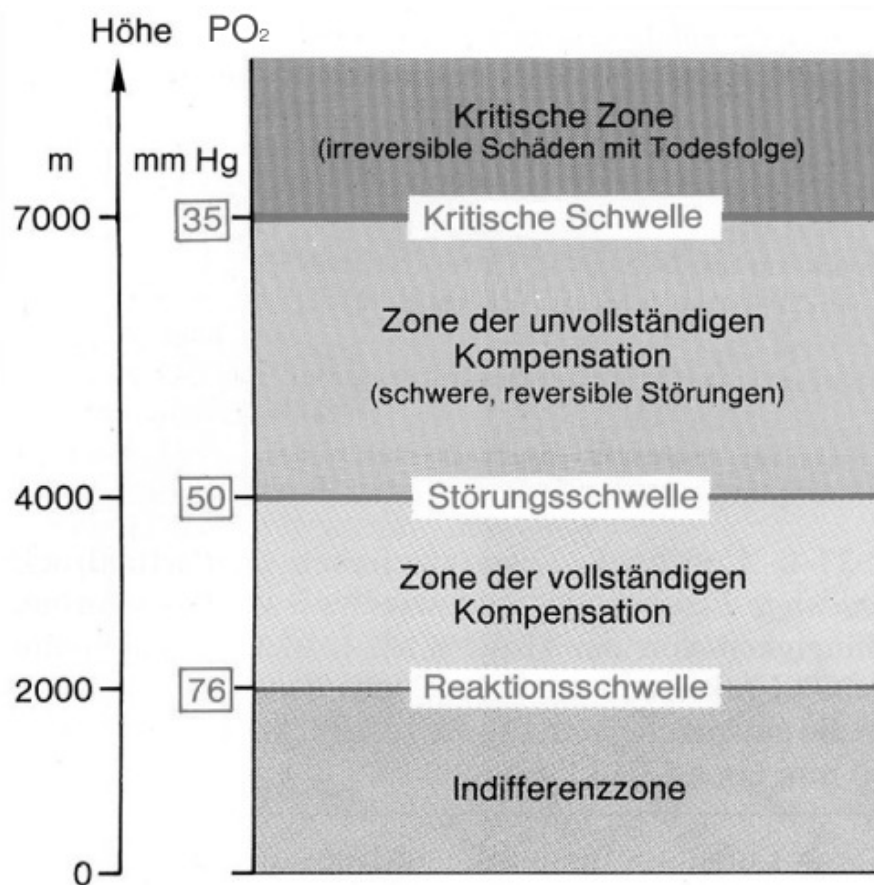


Abbildung 2.12: Höhenzonen [n.47]

Bis zu einer Höhe von 2.000 m und einem Luftdruck von 596 mmHg spricht man von der Indifferenzzone, in der keine körperlichen Veränderungen in Bezug auf Höhe nachweisbar sind.

Die Reaktionsschwelle stellt den Übergang zur Zone der vollständigen Kompensation dar. Ab 2.000 m beginnen die Reaktionen des Organismus in Ruhe auf den abneh-

menden O_2 -Gehalt der Inspirationsluft. Herzfrequenz, Herzzeitvolumen und Atemzeitvolumen steigen geringfügig an.

Oberhalb der Störungsschwelle zwischen 4.000 und 7.000 m befindet sich die Zone der unvollständigen Kompensation. Der O_2 -Partialdruck unterschreitet die tolerable Grenze von 50 mmHg und fällt im Verlauf auf ungefähr 35 mmHg ab. In dieser Gefahrenzone kommt es zu schweren, noch reversiblen Störungen. Physische Leistungsfähigkeit, Reaktionsvermögen und Entscheidungsfähigkeit sind in hohem Maß beeinträchtigt. Neben Muskelzuckungen, Blutdruckabfall und Lungenödem tritt eine reversible Bewusstseinstrübung ein, sofern der O_2 -Mangel innerhalb kurzer Zeit behoben wird. Beim Überschreiten der kritischen Schwelle in etwa 7.000 m beginnt die kritische Zone. Der alveoläre O_2 -Partialdruck unterschreitet die kritische Schwelle von 35 mmHg. Die nun schnell auftretenden lebensbedrohlichen zentralnervösen Störungen mit Bewusstlosigkeit und Krämpfen sind nur innerhalb kurzer Zeit und nach schneller Erhöhung des inspiratorischen O_2 -Partialdruckes reversibel. Danach kommt es zum Höhentod [47].

2.4.2 Höhenumstellung

Kurzfristige Höhenaufenthalte, die physiologische Reaktionsmechanismen im Organismus innerhalb weniger Stunden bewirken, werden als Höhenumstellung bezeichnet. Es kommt zu Veränderungen des Herz-Kreislauf-Systems, der Atmung, des Sauerstoffsystems und des Säure-Basen-Haushalts.

Höhenumstellung kann nach passiven oder aktiven Höhenaufenthalten erfolgen. Zur Höhenumstellung zählen aktive und passive Aufenthalte in der Höhe wie sie etwa beim Fliegen, bei Freizeitaktivitäten in den Bergen, wie Bergsteigen oder passiver Höhenaufstieg in große Höhen mit einer Bergbahn vorkommen.

Ab 2.000 m Höhe kommt es zu einem leichten Anstieg der Herzfrequenz in Ruhe. In 6.000 m beträgt Herzfrequenz 120 Schläge/ Minute. Bei körperlicher Arbeit nimmt die Herzfrequenz in der Höhe deutlicher zu. Das Schlagvolumen verändert sich nahezu nicht. Somit ist das Herzzeitvolumen in Ruhe gering, bei körperlicher Belastung deutlich erhöht. Der Blutdruck ändert sich nur unwesentlich [47].

Über den verminderten O_2 -Gehalt in der Inspirationsluft und die damit einhergehende Abnahme des O_2 -Partialdruckes im arteriellen Blut kommt es zu einer geringen Steigerung des Atemantriebs. Das Atemzeitvolumen ändert sich nur langsam. Es liegt in 5.000 m um 10 %, in 6.000 m bereits um 100 % über den Werten auf Meereshöhe. Bei körperlicher Belastung erhöht sich das Atemzeitvolumen wesentlich schneller.

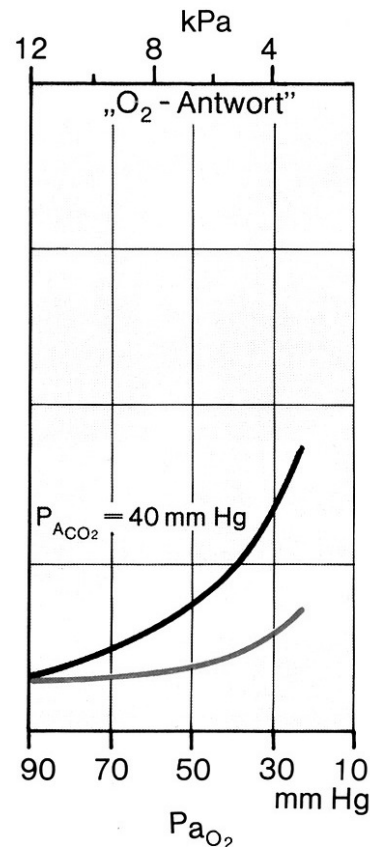


Abbildung 2.13: Abhängigkeit von Atemzeitvolumen ($\dot{V}E$) zu arteriellem O_2 -Partialdruck (P_{aO_2}) [n. 47]

Bei einer Abnahme des O_2 -Partialdruckes im arteriellen Blut lässt sich eine Steigerung der Ventilation beobachten. Abbildung 2.13 beschreibt die Abhängigkeit des Atemzeitvolumens $\dot{V}E$ vom jeweiligen arteriellen O_2 -Partialdruck P_{aO_2} . Der obere Kurvenverlauf gilt für einen konstanten CO_2 -Partialdruck von 40 mmHg und stellt die Antwort auf den isolierten O_2 -Atmungsantrieb dar. Tatsächlich kommt es aber zu einer Wechselwirkung mit dem CO_2 -Antrieb. Eine sauerstoffbedingte Hyperventilation führt zum Abfall des arteriellen CO_2 -Partialdruckes, so dass dessen Antriebsfunktion gemindert wird. Daher lässt sich bei der daraus resultierenden O_2 -Antwort, abgebildet in der unteren Kurve, nur eine geringe Ventilationssteigerung mit der Abnahme des O_2 -Partialdruckes feststellen. Praktisch wird dieser Effekt erst dann wirksam, wenn eine deutliche Hypoxie besteht und der O_2 -Partialdruck unter 55 mmHg abfällt [47].

In einer angenommenen Reiseflughöhe von 10.000 bis 12.000 m entspricht der Kabinendruck im Flugzeug Werten zwischen 1.500 bis 2.500 Höhenmetern. Entsprechend nimmt der O_2 -Partialdruck in der Inspirationsluft bzw. in den Alveolen von 160 bzw. 103 mmHg auf Meereshöhe auf Werte von ca. 118 bzw. 69 mmHg ab. Die

O_2 -Sättigung des Hämoglobins liegt auf Reise Flughöhe im Mittel bei 93 % [22]. Der CO_2 -Partialdruck fällt mit zunehmender Höhe, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß. Aufgrund der höhenbedingten CO_2 -Abnahme kommt es zu einer Änderung des pH-Wertes. In 6.500 m beträgt der CO_2 -Partialdruck noch 20 mmHg, der pH-Wert ist von seinem Normwert auf 7,5 angestiegen [47].

2.4.3 Höhenakklimatisation

Mittel- und langfristige Höheng Aufenthalte führen vor allem aufgrund von arterieller Hypoxie und respiratorischer Alkalose zu Anpassungsmechanismen im Organismus. Die Zeitspanne bis zu einer völligen Anpassung an die Höhe liegt zwischen Monaten und Jahren und hat individuellen Charakter. Die höchsten menschlichen Ansiedlungen liegen in den Anden auf etwa 5.300 m und gelten als Grenze für dauerhafte Höhenverträglichkeit [46]. Im Laufe der Höhenakklimatisation kommt es wie auch bei der Höhenumstellung zu Veränderungen im Herz-Kreislauf-System, bei der Atmung, bei Sauerstofftransport und Säure-Basen-Haushalt im Organismus. Zum besseren Verständnis der Höhenakklimatisation wurden verschiedene Parameter von Bewohnern der Andenregion auf 4.540 m mit denen von Tieflandbewohnern in Lima verglichen [29,36].

Die Herzfrequenz beträgt in Ruhe im Mittel bei beiden Gruppen 72 Schläge/ Minute. Für den Blutdruck lassen sich bei Höhenbewohnern niedrigere Werte von im Mittel 93/63 mmHg im Vergleich zu 116/79 mmHg bei Flachlandbewohnern messen. Das Atemzeitvolumen ist in der Höhe leicht erhöht. Der alveoläre O_2 -Partialdruck beträgt im Mittel 51 mmHg bzw. 104 mmHg, der alveoläre CO_2 -Partialdruck 29,1 mmHg bzw. 38,6 mmHg. Die O_2 -Sättigung zeigt bei Höhenakklimatisierten in 4.540 m im Mittel Werte von 81 %, bei Flachlandbewohnern von 98 %. Je größer der O_2 -Mangel in der Höhe ist, desto stärker wird die Erythropoese zu Kompensationszwecken stimuliert. Nach wenigen Tagen steigt die Menge der Retikulozyten als letzte Vorstufe der freien Erythrozyten an. Erythrozytenzahl, Hämoglobinkonzentration und Hämatokrit nehmen ebenfalls deutlich zu. Innerhalb von zwei Tagen nach Höhenexposition steigt der 2,3-DPG-Gehalt der Erythrozyten von 85 $\mu g/ml$ auf 140 $\mu g/ml$ Blut an und führt zu einer Rechtsverschiebung der O_2 -Bindungskurve, welche die durch respiratorische Alkalose hervorgerufene Linksverschiebung zunächst kompensiert. Nach längerer Zeit der Höhenanpassung kommt es zur Überkompensation mit Rechtsverschiebung der O_2 -Bindungskurve. Über die vermehrte Bicarbonat-Ausscheidung der Nieren bei Höhenakklimatisation kommt es zur Normalisierung des pH-Wertes im Blut. Zudem ist durch die erhöhte Hämoglobinkonzentration die Pufferkapazität des Blutes erhöht. Die

Pufferkapazität des Gewebes nimmt wegen des Bikarbonat-Verlustes ab. Als Folge davon kommt es zu Elektrolyt-Verschiebungen [47].

2.4.4 Höhenexposition in der Schwangerschaft

Die Höhenexposition Schwangerer wie auch nicht-Schwangerer lässt sich grundsätzlich in aktiv und passiv sowie kurzfristig und langfristig unterscheiden. Unter passiver Höhenexposition versteht man diejenigen Aufenthalte in der Höhe, welche ohne zusätzliche körperliche Anstrengungen von statten gehen. Das sind beispielsweise Aufstiege in große Höhen als Passagier von Flugzeug, Helikopter oder Bergbahn.

Im Gegensatz dazu sind aktive Aufenthalte in der Höhe mit unterschiedlich hohem Maß an körperlicher Aktivität verbunden. Dies können die Tätigkeiten von Flugbegleiterinnen im Flugzeug, der Aufstieg bei einer Bergtour auf höhere Berge oder sportliche Aktivitäten in großen Höhen sein.

Die körperlichen Reaktionen auf Höhenexposition variieren nach Art und Ausmaß des Aufenthaltes in der Höhe. Bei schwangeren Frauen kommen zu den normalen Höhenbelastungen die körperlichen Veränderungen, bedingt durch Schwangerschaft, hinzu. Zudem sind die möglichen physischen Veränderungen als Antwort auf eine Höhenexposition in der Schwangerschaft, in Zusammenhang zu den Vitalparametern des Feten zu setzen, um eine körperliche Gefährdung des Feten durch Hypoxie in der Höhe auszuschließen. Somit verdient der Aufenthalt in großen Höhen im Rahmen einer Schwangerschaft besondere Beachtung.

Kurzfristige Höhengaufenthalte werden von langfristigen Aufenthalten in großer Höhe unterschieden. Definitionsgemäß spricht man von großer Höhe ab 2.500 Höhenmetern. Rund 50 Millionen Menschen auf der Erde leben in solchen Höhen [6].

Über den dauerhaften Einfluß großer Höhe auf die Lungenfunktion bei Schwangeren existieren nur wenige Daten. Längerfristige Höhenexposition bedeutet aber in jedem Fall eine signifikante Veränderung der Atmung. Es kommt zu einer Abnahme der funktionellen Residualkapazität und des expiratorischen Reseevolumens mit gleichzeitiger Zunahme der inspiratorischen Kapazität.

Beim Vergleich Schwangerer und nicht-Schwangerer Frauen auf Meereshöhe und in 4.300 m in den peruanischen Anden konnten McAuliffe et al. [35] signifikante Veränderungen der Lungenfunktion feststellen.

Auf Meereshöhe wurden ein um 10 % höheres Reservevolumen und eine um 4,6 % höhere totale Lungenkapazität gemessen. Bei in großer Höhe lebenden Frauen wurde

ein um 10-25 % erhöhtes expiratorisches Reservevolumen und Residualkapazität gemessen. Obwohl Frauen in großer Höhe durchschnittlich um vier cm kleiner gemessen wurden, wiesen sie größere Lungenvolumina auf, als ihre Vergleichsgruppe auf Meereshöhe. Die totale Lungenkapazität der Frauen, die in großer Höhe dauerhaft lebten war um ungefähr einen Liter größer, als die der Flachlandbewohnerinnen [36].

Die schwangere Frau verfügt über verschiedene Adaptionenmechanismen, um den höhenbedingten Abfall des O_2 -Partialdruckes zu kompensieren. Messungen des arteriellen O_2 -Partialdruckes ergaben bei nicht-Schwangeren auf 4.400 m im Mittel einen Wert von 51 mmHg, während bei Schwangeren ein Partialdruck von 59 mmHg gemessen werden konnte. Der CO_2 -Partialdruck betrug auf vergleichbarer Höhe 32 bzw. 25 mmHg. Diese Werte lassen den Schluß zu, dass die in der Schwangerschaft bereits physiologischerweise vorhandene Hyperventilation in der Höhe noch weiter zunehmen kann und so eine Erhöhung des O_2 -Partialdruckes bedingen kann. Die Hyperventilation stellt einen wichtigen Kompensationsmechanismus auf die höhenbedingte Abnahme des O_2 -Partialdruckes dar. Ein weiterer bedeutender Kompensationsmechanismus ist die mit zunehmender Höhe steigende Hämoglobinkonzentration. Schwangerschaft in großer Höhe, verglichen mit gleichem Zustand auf Meereshöhe, geht mit niedrigerem Geburtsgewicht einher. Die Neugeborenen von Müttern, welche in großen Höhen leben, sind durchschnittlich um 300g leichter und um einen cm kürzer [35]. Die Plazenta ist bei in großer Höhe lebenden Schwangeren, relativ zum niedrigeren Kindsgewicht, voluminöser und schwerer [6].

In der 25. Schwangerschaftswoche erreicht die mütterliche Pumpleistung des Herzens seinen Peak. Sie liegt auf Meereshöhe im Mittel um 41 % und in großen Höhen um 17 % höher, verglichen mit den Ausgangswerten. Es lässt sich feststellen, dass Schwangerschaft von Bewohnerinnen großer Höhen, verglichen mit denen auf Meereshöhe mit einer im Mittel um 31 % niedrigeren Pumpleistung und einem um 8 % verminderten mittleren arteriellen Druck einhergeht [29].

2.5 Fliegen in der Schwangerschaft

2.5.1 Allgemeine Richtlinien der Airlines

Für schwangere Passagiere gelten in der nationalen wie auch internationalen zivilen Luftfahrt fast ausnahmslos Beförderungsbeschränkungen für Routine-Transporte. Die Richtlinien sind unterschiedlich flexibel. Im allgemeinen gilt jedoch, je weiter die Schwangerschaft fortgeschritten ist, desto restriktiver wird die Beförderung im Flugzeug gehandhabt.

Für reisende Schwangere gibt es bislang keine Möglichkeiten, die intransparenten Bestimmungen zur Beförderung zentral abzurufen. Dazu kommt die sich schnell ändernde Vielfalt an Fluggesellschaften. Gerade kleinere Billiganbieter und Fusionen verschiedener Gesellschaften machen es dem Laien schwer, den Überblick zu behalten.

So entstanden jüngst zwei Konkurrenten auf dem Markt der Billigfluglinien. Air Berlin kaufte im September 2006 DBA, welche kurz zuvor Germania Express übernommen hatte. Im März 2007 kaufte Air Berlin zudem LTU. Ihr gegenüber steht TUI fly, welche unter ihrem Namen Hapag fly und HLX subsummiert. Air Berlin und LTU können auf eine Flotte von 119 Flugzeugen und 25 Millionen beförderte Passagiere pro Jahr blicken. TUI fly schließt mit 120 Flugzeugen gleich auf. Condor hat einen Marktanteil von 36 Flugzeugen. Air Berlin und Condor machen zudem Code-Sharing. Das heißt, sie teilen sich zur besseren Auslastung die Linienflüge. Mit solchen Transaktionen wird die Zahl der Fluggesellschaften immer kleiner, die Beförderungsbestimmungen für Schwangere aber nicht klarer.

Einige große deutsche Airlines verweisen auf ihrer Homepage im Internet auf die besonderen Richtlinien zur Beförderung schwangerer Passagiere [52,54,55,58,60,61,62,63,66,67]. Für alle anderen Airlines ist zur Klärung besonderer Fragen ein Anruf bei der Hotline der jeweiligen Airline oder eine direkte Anfrage im Reisebüro nötig. Der Beförderungszeitraum schwangerer Passagiere ist abhängig von Airline und Schwangerschaftswoche, in welcher sich die schwangere Flugreisende bei Antritt des Hin- und Rückfluges befindet.

Exemplarisch seien hier die Richtlinien von 10 großen deutschen Airlines aufgeführt. Von den 10 dargestellten Airlines unterscheidet mittlerweile keine Airline mehr in Bezug auf Beförderungszeitraum zwischen Art der Schwangerschaft (Einlings- oder Mehrlingsschwangerschaft) und Länge der Flugstrecke (Kurz- oder Langstreckenflug). Die Airlines liegen ähnlich in ihren Beförderungsbestimmungen für schwangere Passagiere. Sie befördern werdende Mütter größtenteils bis zur 35. bzw. 37. Schwangerschaftswoche.

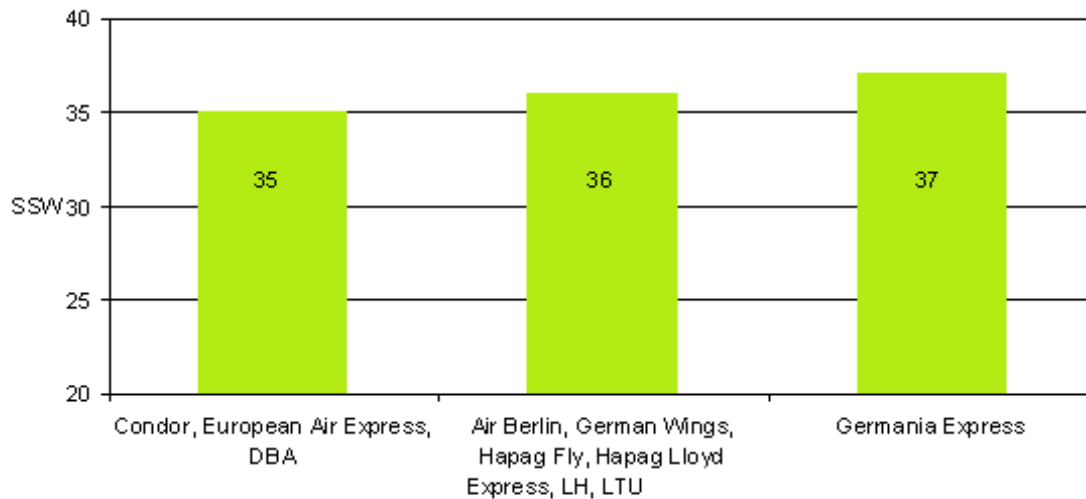


Abbildung 2.14: Beförderungsrichtlinien großer deutscher Fluggesellschaften

Condor, European Air Express und DBA befördern Schwangere bis zur 35. Schwangerschaftswoche, Germania Express hingegen bis zur 37. Schwangerschaftswoche. Die meisten der 10 Fluggesellschaften befördern schwangere Passagiere bis zur 36. Schwangerschaftswoche. Hier seien Air Berlin, German Wings, HapagFly, Hapag Lloyd Express, LTU und Lufthansa genannt. Als Marktführer der deutschen Fluglinien sei Lufthansa hervorgehoben. Lufthansa befördert schwangere Flugreisende ohne gesundheitliche Probleme generell bis zur 36. Schwangerschaftswoche. Danach kann die Schwangere mit aktueller Flugtauglichkeitsbescheinigung eines Fliegerarztes der Lufthansa bis zum Ende der Schwangerschaft ihren Flug antreten. Für diesen Fall gibt Lufthansa auf seiner Homepage Kontaktdaten für gesellschaftseigene Fliegerärzte an, welche die werdende Mutter direkt kontaktieren kann.

Die Attestpflicht wird bei den deutschen Airlines unterschiedlich gehandhabt. Für den Fall, dass die Vorlage eines Attestes überhaupt erforderlich ist, sollten die Bestimmungen direkt bei der jeweiligen Airline erfragt werden.

Allgemein gilt für die von den Airlines geforderten Atteste, dass sie nicht älter als sieben Tage sein dürfen und Angaben über den aktuellen Gesundheitszustand sowie den voraussichtlichen Geburtstermin enthalten müssen. Wahlweise können sie von Ärzten oder Hebammen ausgestellt werden.

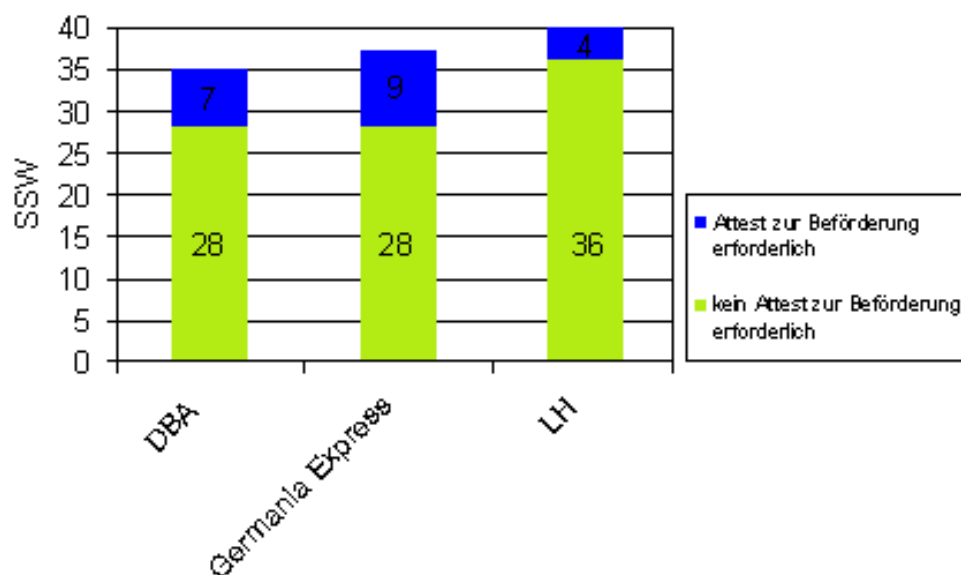


Abbildung 2.15: Attestrichtlinien großer deutscher Fluggesellschaften

Nur drei der oben aufgeführten 10 großen deutschen Fluggesellschaften haben in ihren Regelungen noch eine Attestpflicht für schwangere Passagiere verankert.

Für DBA und Germania Express ist ab der 28. Schwangerschaftswoche ein ärztliches Attest Voraussetzung zum Antritt einer Flugreise. Lufthansa nimmt hier eine Sonderstellung ein. Um jenseits der 36. Schwangerschaftswoche befördert zu werden, ist die Genehmigung eines Fliegerarztes der Lufthansa erforderlich.

Bei den übrigen Fluggesellschaften erhält der nachfragende Kunde über die Hotlines die Auskunft, dass sicherheitshalber neben dem zwingend erforderlichen Mutterpass zu jedem Zeitpunkt der Schwangerschaft ein ärztliches Attest mitgeführt werden sollte, um eventuell auftretende Probleme bei der Beförderung zu umgehen.

Andere deutsche Fluggesellschaften haben sich den Richtlinien der International Air Transport Association (IATA) weitestgehend angeschlossen. IATA befördert schwangere Passagiere bei Einlingsschwangerschaften bis zur 36. Schwangerschaftswoche, bei

Mehrlingsschwangerschaften bis zur 32. Schwangerschaftswoche. In jedem Fall wird ab der 28. Schwangerschaftswoche ein Attest von Arzt oder Hebamme gefordert, das Auskunft über den aktuellen Gesundheitszustand der Schwangeren und den voraussichtlichen Geburtstermin gibt. Außerdem gilt ein Beförderungsverbot für Mutter und Neugeborenes bis 7 Tage nach Geburt [64]. Grund dafür könnten die beim Neugeborenen möglicherweise noch vorhandenen kleinen atelektatischen Lungenareale sein. Sie könnten in der Höhe zu einem Mißverhältnis im Ventilations-/ Perfusionsverhältnis in der Lunge des Neugeborenen führen. Zwischen dem zweiten und siebten Tag nach Geburt sind diese kleinen Atelektasen verschwunden [42].

Internationale Airlines übernehmen großenteils die Bestimmungen der IATA, andere weichen aber auch erheblich davon ab. Das American College of Obstetricians and Gynecologists (ACOG) stellt in seiner Committee Opinion fest, dass Schwangere ohne gynäkologische oder andere medizinische Probleme ohne Einschränkung bis zur 36. Schwangerschaftswoche sicher fliegen können [1] und stützt damit die Beförderungsbeschränkungen der meisten amerikanischen Airlines, wie auch der IATA. Die australische Fluggesellschaft Qantas beispielsweise unterscheidet zwischen Inlandsflügen und internationalen Flugrouten. Innerhalb Australiens ist wegen der Größe des Landes unkomplizierter Flugtransport Schwangerer ohne strenge Richtlinien nötig. Wenn eine Schwangere nicht bereits unter der Geburt die Abfertigungshalle betritt, geht man davon aus, dass sie, auch ohne an Bord eines Flugzeuges zu entbinden, an ihrem nationalen Ziel ankommt. Schwangere werden also auf nationalen Flugstrecken ohne Angabe der Schwangerschaftswoche befördert. Für internationale Flüge gilt eine Beförderungsbeschränkung bis einschließlich zur 36. Schwangerschaftswoche in Anlehnung an IATA. Qantas begründet dies mit der geographisch isolierten Lage Australiens und den dadurch notwendigen langen Transatlantikrouten, die eine kurzfristige Flugunterbrechung bei schwangerschaftsbedingten Notfällen unmöglich machen würden [42].

2.5.2 Private Flugreisen

Kurzfristige Umstellung des Organismus

Schwangere Frauen wie auch nicht schwangere Erwachsene reagieren physiologischerweise auf zunehmende Höhe, fallende Luftdruckverhältnisse und eine Reduktion des für die Inspiration verfügbaren Sauerstoffs mit kurzfristigen Adaptionsmechanismen.

Die Kabinen im Inneren eines Flugzeuges der zivilen Luftfahrt verfügen über einen Druckausgleich. Die Werte im Inneren der Kabine entsprechen durchschnittlich einer Höhenexposition zwischen 1.500 m und 2.500 m. Diese Höhenwerte sind ungefähre Angaben und variieren je nach Flugzeugtyp und maximaler Flughöhe. Mit zunehmender Höhe fallen Luftdruck, O_2 -Partialdruck und CO_2 -Partialdruck. Damit wird der Anteil an verfügbarem Sauerstoff bei der Inspiration geringer. Die O_2 -Sättigung nimmt ab.

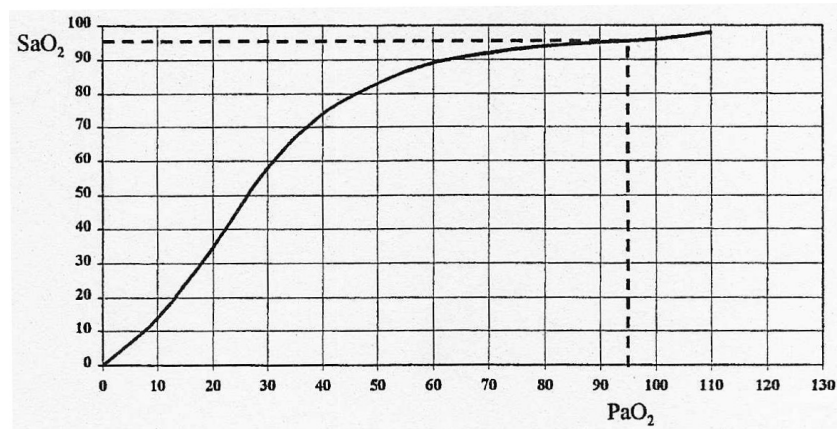


Abbildung 2.16: O_2 -Bindungskurve auf Meereshöhe [n. 16]

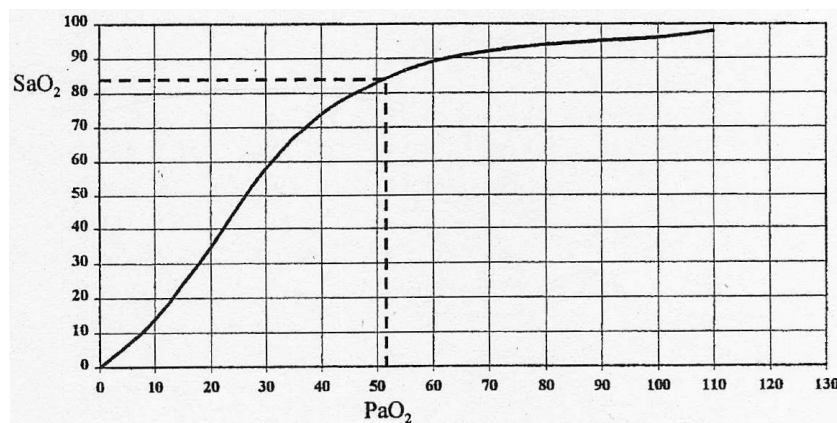


Abbildung 2.17: O_2 -Bindungskurve in 3.048 m [n. 16]

Die oben gezeigten Verläufe der O_2 -Bindungskurve sollen die geringe Abnahme der O_2 -Sättigung bei lungengesunden Erwachsenen auf üblicher Reiseflughöhe in der zivilen Luftfahrt verdeutlichen. So entspricht die O_2 -Sättigung auf Meereshöhe 96%, während sie auf 3.048 m immer noch bei 84% liegt und damit nicht in kritische Bereiche kommt. Der O_2 -Partialdruck fällt von knapp 100 mmHg um 40 mmHg auf knapp 60 mmHg, während der CO_2 -Partialdruck nur um 7 mmHg fällt [16].

Die wichtigsten Bedenken gegen akute Höhenexposition von Schwangeren, wie es beim Fliegen der Fall ist, beruhen auf einer möglichen Gefährdung des Feten durch Abnahme des O_2 -Partialdruckes. Aus der Höhenphysiologie ist bekannt, dass die Kompensationsmechanismen auf die Abnahme des Sauerstoffpartialdruckes ab einer Höhe von ca. 2.000 m einsetzen [6]. Über eine Stimulierung der peripheren Chemorezeptoren nehmen die Herzfrequenz, das Herzminutenvolumen, das Atemminutenvolumen, initial über eine Zunahme des Atemzugvolumens, später über Atemfrequenzsteigerung sowie der systolische Blutdruck zu, während der diastolische Blutdruck eher fällt [27]. Huch et al. [27] untersuchten 1986 auf je zwei Kurzstreckenflügen die physiologischen Reaktionen auf passive Höhenexposition bei zehn gesunden Schwangeren und ihren Feten zwischen der 32. und der 38. Schwangerschaftswoche. Sie konnten eine Abnahme des mütterlichen O_2 -Partialdruckes bei passivem Höhengaufstieg auf Höhen zwischen 2.200 m und 2.400 m von im Mittel 91 mmHg auf 65 mmHg messen. Der fetale O_2 -Partialdruck nahm bei deutlich geringeren Ausgangswerten von im Mittel 31 mmHg auf 26 mmHg ab. Diese geringfügige Abnahme des fetalen O_2 -Partialdruckes führte zu keiner deutlichen Veränderung der fetalen Herzfrequenz. Es konnte, wenn auch an einem relativ kleinen, Kollektiv gezeigt werden, dass eine höhenbedingte Abnahme des O_2 -Partialdruckes bei Flügen auf üblicher Reiseflughöhe in der zivilen Luftfahrt keine problematischen Auswirkungen, im Sinne von Hypoxie, auf gesunde Mütter oder Feten hat. Diese Arbeit stützte erstmals die heute gängige These, dass gesunde Schwangere problemlos gelegentliche Flugreisen unternehmen können.

Der bei den Müttern gemessene CO_2 -Partialdruck blieb während aller Flughöhen und aller Flugphasen konstant. Die Atemfrequenz der untersuchten Mütter lag während des gesamten Fluges im Mittel zwischen 20 und 26 Atemzügen pro Minute. Vor und kurz nach dem Start des Flugzeugs war ein leichter Anstieg zu verzeichnen, der aber im Verlauf des Fluges wieder rückläufig war [27].

Die mütterliche Herzfrequenz wurde zu Beginn der Flüge mit einer Baseline von 86 Schlägen pro Minute aufgezeichnet und nahm während der Flüge beständig zu. Im Verlauf konnten Huch et al. drei Anstiege der Herzfrequenz feststellen. Bei Start, auf maximaler Reiseflughöhe und bei der Landung, wobei ein signifikant erhöhter Peak auf maximaler Flughöhe festgestellt wurde. Fünf der untersuchten Schwangeren zeigten

zyklische Herzfrequenzänderungen in Abständen von 2-3 Minuten mit einer Amplitude von ungefähr 20 Schlägen pro Minute. Der Rückgang der Herzfrequenzerhöhung zur initialen Baseline ging regelmäßig mit einer leichten Uteruskontraktion einher [27].

Der mittlere systolische und diastolische Blutdruck lag zwischen 116 und 124 mmHg und 66 und 74 mmHg. Systolischer und diastolischer Blutdruck lagen auf maximaler Flughöhe leicht über der Baseline, erreichten nach der Landung aber ohne Verzögerung wieder ihre Ausgangswerte [27].

Huch et al. konnten auf die kurzfristige Höhenexposition moderate aber signifikante kardiopulmonale Veränderungen bei den untersuchten Müttern feststellen, aber keine signifikanten Veränderungen bei den Feten [27].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die kurzfristigen Adaptionsmechanismen auf die Höhen- und Luftdruckverhältnisse beim Fliegen in der zivilen Luftfahrt bei komplikationsloser Schwangerschaft ohne negative Auswirkung auf die Gesundheit von Mutter und Feten bleiben.

Kritisch kann vermerkt werden, dass es sich hier um nur sehr spärliche Untersuchungen Schwangerer und ihrer Feten im Flugverkehr handelt, die alle einen unbedenklichen Gesundheitszustand ohne Vorerkrankungen aufwiesen. Anders könnte es bei Müttern aussehen, die bekannte gesundheitliche Probleme haben und dabei zusätzlich mit den Veränderungen der Höhe konfrontiert werden. Wie bereits beschrieben, sind gesunde Schwangere in keiner relevanten Weise von der Abnahme des O_2 -Partialdruckes und der im Flugzeug herrschenden milden Hypoxie beeinflusst. Für Schwangere, wie natürlich auch nicht-Schwangere, mit bestehenden Erkrankungen der Lunge oder des Herz-Kreislauf-Systems könnten diese Änderungen der Druck- und Sauerstoffverhältnisse in der Höhe zu gesundheitlichen Problemen führen.

Diesbezüglich empfehlen die American Thoracic Society, die British Thoracic Society und die Aerospace Medical Association, dass der O_2 -Partialdruck während allen Flugphasen über 50 - 55 mmHg gehalten werden sollte. Unterhalb dieser Werte ist für prädisponierte Passagiere eine O_2 -Zufuhr notwendig [41]. Personen mit chronischer Hypoxie könnten einen deutlich höheren Abfall der O_2 -Sättigung in Reiseflughöhe aufweisen, als diejenigen mit uneingeschränkter Lungenfunktion. Als guter initialer Test ist die O_2 -Sättigung auf Meereshöhe anzusehen. Liegen die Werte hier unter 92-95 %, so ist ein deutlicher Abfall auf Reiseflughöhe mit eventuellen gesundheitlichen Problemen zu erwarten. Humphreys et al. konnten bei einem Passagier, bei einem Ausgangswert von 94 % für die O_2 -Sättigung, einen Abfall auf 85 % auf Reiseflughöhe feststellen [28]. Wobei zusätzlich darauf hingewiesen werden muss, dass ältere Passagiere generell einen niedrigeren Ausgangswert der O_2 -Sättigung haben, der in

der Höhe noch deutlicher abfällt. Dies gilt vor allem für Passagiere mit chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen. Bei Passagieren mit bekannten Herzerkrankungen besteht aufgrund des verminderten O_2 -Angebotes ein erhöhtes Risiko für Ischämien und Arrhythmien [40].

So nennt die IATA als Kontraindikationen für Flugreisen unter anderem gehäufte myokardiale Infarkte und akute zerebrovaskuläre Erkrankungen, Hypertonien mit einem systolischen Druck über 200 mmHg, Angina pectoris und schwere chronische Atemwegserkrankungen [64].

Prävention schwangerschaftsbedingter möglicher Komplikationen

Mit dem Thema Fliegen in der Schwangerschaft werden eine Reihe von Faktoren in Verbindung gebracht, die sich negativ auf Mutter und Feten auswirken könnten. Hierzu wirft sich erfahrungsgemäß die Frage nach nötiger beziehungsweise möglicher Prävention auf.

In direkter Verbindung mit dem Fliegen stehen äußere Einflüsse wie Turbulenzen, Lärm, Vibration, Flugangst und Strahlung. Zum anderen physiologische Veränderungen wie die durch Höhen- und Luftdruck bedingten Gasausdehnungen innerhalb von Körperhöhlen oder die durch verschiedene, eine Reise betreffende Faktoren, begünstigte Phlebothrombose. Schwangeren wie auch nicht-schwangeren Passagieren wird generell empfohlen, auf der gesamten Länge eines Fluges angeschnallt zu bleiben, um vor unvorhergesehenen Turbulenzen geschützt zu sein. Schwangere sollten dieser Empfehlung im Besonderen nachkommen. Während Turbulenzen besteht grundsätzlich ein Verletzungsrisiko, das durch korrekte Benutzung des Sicherheitsgurt vermieden werden kann. Der Sicherheitsgurt sollte unterhalb des Bauches verlaufen, damit bei Turbulenzen Druck auf Plazenta und Ungeborenes vermieden werden kann [1].

Durch Flugangst ausgelöster mütterlicher Stress führt eindeutig nicht zu vorzeitiger Wehentätigkeit und löst damit keine Geburt aus, wenn es vorher noch keine derartigen Anzeichen gab [11,42]. Bei ausgeprägter Flugangst sollte die Schwangere jedoch in persönlichem Interesse die Sinnhaftigkeit des geplanten Fluges überprüfen und eventuell eine andere individuell passendere Alternative finden.

Die Strahlendosis ist während eines Fluges unter normalen Bedingungen so gering erhöht, dass kein Risiko für das Ungeborene zu erwarten ist (Kap.2.7).

Bei einer Reiseflughöhe von ca. 10.000 m entsprechen die Druckverhältnisse im Inneren der Kabine Höhen von ca. 2.200 m bis 2.400 m. Darmgase dehnen sich unter

diesen Bedingungen um nahezu 40 % aus [17]. Durch eingeschränkte Bewegungsmöglichkeit und langes Sitzen gefördert, entstehen so oftmals Meteorismus und Intestinalspasmen. Bei ohnehin vergrößertem Bauchumfang wird dieses Phänomen von Schwangeren als unangenehm empfunden, hat aber keinerlei gesundheitsbeeinträchtigende Auswirkungen zur Folge. Präventiv kann geraten werden, auf blähende Speisen und Getränke zu verzichten und mit bequemer Kleidung zu reisen [1,17,42].

In Verbindung mit längeren Flugstrecken wird immer wieder auf das Risiko einer tiefen Beinvenenthrombose hingewiesen. Definitionsgemäß tritt eine solche „Reisethrombose“ im Anschluß an eine mindestens sechs Stunden andauernde, nicht länger als zwei Wochen zurückliegende Reise auf [21].

Generell haben schwangere Frauen ein erhöhtes Risiko für tiefe Beinvenenthrombosen. Schätzungsweise liegt die Inzidenz für eine tiefe Beinvenenthrombose in der Schwangerschaft bei 1 von 1.000 [32]. Allgemein haben Passagiere auf Mittel- bis Langstreckenflügen im Gegensatz zu nicht-Reisenden ein zwei- bis vierfach erhöhtes Risiko, eine Thrombose zu entwickeln. Das tatsächliche Risiko aller Reisenden, eine Thrombose zu entwickeln, ist dennoch relativ gering [21]. Dabei gibt es keine Unterschiede in der Häufigkeit des Auftretens von Thrombosen zwischen economy-class, business-class oder first-class Reisenden. Bei einer Flugdauer unter drei Stunden liegt das Risiko eine Thrombose zu entwickeln bei nahezu null [21].

Allerdings gibt es für das Auftreten einer Thrombose prädisponierende Faktoren wie Alter über 40 Jahre, Fettleibigkeit, häufige Verletzungen oder Operationen, vorangegangene Thrombosen, venöse Insuffizienz, Hormontherapie oder auch Schwangerschaft [21,64].

Die Pathogenese der Phlebothrombose ist durch die Virchow'sche Trias gekennzeichnet. Endothelalteration, die durch Abknicken und langdauernden Druck der Sitzkante auf die Beinvenen gegeben ist, Verlangsamung der Strömungsgeschwindigkeit durch lokale Stase und Veränderung der Blutzusammensetzung, welche durch vermehrte Viskosität über Dehydratation zustande kommen kann. Nach aktuellen Studien sind die Risiken für eine Thrombose beim Fliegen gegenüber anderen Reisearten wie PKW und Eisenbahn nicht erhöht [19].

Präventiv kann Schwangeren nachfolgende Empfehlung gegeben werden. Häufiger Wechsel der Sitzposition, möglichst alle halbe Stunde, Gangplatz mit genügender Beinfreiheit und Bewegung im Gang soweit möglich, eventuell Kompressionsstrümpfe, locker angelegter Sicherheitsgurt und ausreichende Flüssigkeitszufuhr von 2-3 Litern pro Tag. Idealerweise wird bei Flügen über fünf Stunden eine Heparinisierung mit

niedermolekularem Heparin nach Absprache mit dem betreuenden Arzt empfohlen [1,39].

2.5.3 Fliegen als berufliche Tätigkeit

Flugbegleiterinnen

Die Situation schwangerer Flugbegleiterinnen muss gesondert betrachtet werden. Sie sind im Gegensatz zu Passagieren einem höheren Risiko für gesundheitliche Probleme ausgesetzt. Zusätzlich zu den Effekten der Höhenexposition ist die physische Arbeit der schwangeren Flugbegleiterin zu berücksichtigen.

Flugbegleiterinnen sind auf den von ihnen betreuten Flugstrecken einer Mehrfachbelastung ausgesetzt. Ihre Aufgabe ist es, auf sämtliche Situationen angemessen zu reagieren. Sie sind ohne Einschränkung für das Wohl der Passagiere inklusive Notfall-Evakuierung verantwortlich. Sie sind den höhenbedingten physiologischen Veränderungen in Kombination mit körperlicher Arbeit ausgesetzt, was zu einer erheblichen körperlichen Mehrbelastung führt. Aus arbeitsrechtlichen Gründen darf es zu keiner Überschreitung der Richtlinien für festgelegte Strahlenbelastung kommen.

Das relative Risiko von Flugbegleiterinnen für eine Fehlgeburt liegt im Gegensatz zu anderen, in einem Arbeitsverhältnis stehenden, Schwangeren bei 1,3. Damit kann ein erhöhtes Risiko für Fehlgeburten zwar nicht ausgeschlossen werden, ist aber nicht so hoch, wie bislang angenommen [15].

Diese Gründe führen bei Flugbegleiterinnen zu einem strikt festgelegten Arbeitsschema. Im Falle einer Schwangerschaft werden Flugbegleiterinnen meist sofort, wie unter anderem bei Lufthansa, vom Flugdienst befreit und als Bodenpersonal eingesetzt. Allgemein kann der Lufteinsatz bis zur 20. SSW genehmigt werden [1].

Die von Flugbegleiterinnen erbrachte physische Arbeit in der Höhe wird als eindeutig anstrengend empfunden. Es kommt zu deutlichen Herzfrequenzsteigerungen bei vergleichbaren Arbeiten am Boden bzw. in der Höhe. Selbst normales Laufen im Kabinenflur eines Flugzeugs bei verschiedenem Grad des Aufstiegs eines Flugzeugs führt zu signifikanter Erhöhung der Herzfrequenz [6].

Für schwangere Flugbegleiterinnen gilt der Richtwert für eine zusätzliche Strahlenbelastung aus kosmischer Strahlung laut Internationaler Strahlenschutz Kommission von 1 mSv pro Jahr [17]. Errechnet man auf der Grundlage der von der WHO veröffentlichten Strahlenwerte für Kurz- und Langstreckenflüge (Kap. 2.7), die Strahlenwerte für die jeweiligen Flüge, so verdeutlicht sich die Einschränkung der Flugzeiten für schwangere Flugbegleiterinnen. Auch aus Gründen des Strahlenschutzes ist es unbedingt zu

befürworten, dass schwangeres fliegendes Personal möglichst unmittelbar nach Bekanntwerden einer Schwangerschaft am Boden eingesetzt wird.

Die meisten Fluggesellschaften befreien Pilotinnen ab Bekanntgabe ihrer Schwangerschaft ohnehin vom Flugdienst. Bei dem Rücklauf der eigenen Fragebogenaktion konnten wir feststellen, dass alle antwortenden deutschen Airlines ab Bekanntgabe einer Schwangerschaft mit sofortiger Wirkung Pilotinnen wie auch Flugbegleiterinnen vom Flugdienst ausnehmen.

2.5.4 Medizinische Transporte

Der Transport von Patienten per Flugzeug oder Helikopter ist mittlerweile essentieller Bestandteil moderner medizinischer Hilfe. Die Gründe für medizinische Transporte sind vielfältig und reichen von lebensrettenden Notfalleinsätzen über frühzeitige Verlegung eines Patienten mit zu erwartenden schwerwiegenden Komplikationen, welche die Behandlung an einer bestimmten Lokalität erfordern, bis hin zu isoliert lebenden Patienten, welche medizinische Infrastruktur benötigen.

Die schwangere Patientin ist ein klassisches Beispiel dafür, dass sich die Transportbedingungen bei medizinisch indizierten Transporten zwischen Routine und Notfall bewegen können. Die U.S. Air Force führte 1992 eine 12-monatige Untersuchung von 329 Schwangeren durch, die zwischen der 12. und 39. Schwangerschaftswoche auf dem Luftweg während eines Zeitraumes zwischen 0,9 und 12,6 Stunden transportiert wurden [12]. 179 Patientinnen wurden zu einer „Storch-Nest-Einheit“ transportiert, welche über geburtshilfliche und neonatale Einrichtungen verfügen. Hiervon wurden 19 Patientinnen während des zweiten Trimesters, die verbleibenden 160 Patientinnen ausnahmslos nach der 34. Schwangerschaftswoche, transportiert. Die übrigen 150 Patientinnen wurden als Hochrisiko-Kollektiv befördert. Vier der insgesamt 329 Patientinnen entwickelten während des Kurz- bzw. Langstreckentransportes physische Probleme. Der Gesundheitszustand von Mutter und Kind konnte in allen Fällen stabil gehalten werden. Es kam zu keiner Geburt während aller untersuchten medizinischen Flugtransporte [12].

Diese Arbeit verdeutlicht, dass Luftfahrt-Medizinische Einsätze für schwangere Patientinnen selbst aus dem Hochrisiko-Kollektiv in jedem Schwangerschaftsalter und auf jeder Distanz als sicher eingestuft werden können [12].

2.5.5 Auswirkungen auf den Feten

Feten haben physiologischerweise einen deutlich vom Erwachsenen abweichenden O_2 -Bedarf, eine andere O_2 -Ausschöpfung und eine niedrigere O_2 -Sättigung.

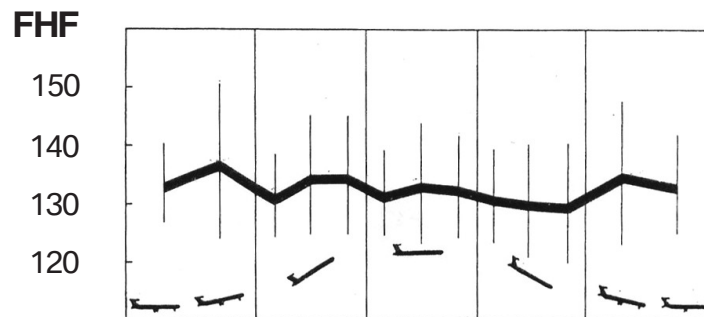


Abbildung 2.18: Baseline der mittleren fetalen HF (n. 27)

Huch et al. stellten in ihrer Untersuchung von 1986 in Bezug auf die physiologischen Adaptionsmechanismen von Feten auf passive Höhenexposition in der zivilen Luftfahrt fest, dass sich die mittlere fetale Herzfrequenz in allen Flugphasen innerhalb der Normwerte befand, obwohl ein kleiner, wenn auch statistisch signifikanter Anstieg, kurz nach dem Start und unmittelbar vor der Landung des Flugzeuges verzeichnet werden konnte [27].

Die aufgezeichneten Herzfrequenzmuster von sieben Feten zeigten keine Relation in Bezug auf die verschiedenen Flugphasen. Nur dreimal konnten während Start und Aufstieg des Flugzeugs und in einem Fall auf Reiseflughöhe Beschleunigungen der Herzfrequenz aufgezeichnet werden. Dreimal waren sie nur von kurzer Dauer und einmal wurden sie über acht Minuten (180 Schläge pro Minute) dargestellt, was aber ein einmaliges Ereignis blieb und auf dem Rückflug nicht mehr auftrat. Diese Erhöhung der fetalen Herzfrequenz korrelierte nicht mit denen der Mütter, so dass die Feten hier wohl am ehesten auf Vibration und Beschleunigung beim Abheben des Flugzeuges und nicht als Konsequenz auf möglichen mütterlichen Stress beim Fliegen reagierten. Während 30 Stunden Aufzeichnung konnte kein, in Bezug auf Hypoxie, auffälliges Herzfrequenzverhalten der Feten dokumentiert werden [27].

Eine mütterliche Hypoxie müsste sehr deutlich ausgeprägt sein, wenn der Fet in seiner O_2 -Versorgung pathologisch eingeschränkt wäre. Der Fet verfügt offenbar über wirksame Kompensationsmechanismen, indem er Blut zu den lebenswichtigen Organen umverteilt, die Organdurchblutung durch eine Zunahme der Herzfrequenz steigert, die O_2 -Ausschöpfung des Blutes erhöht und den O_2 -Verbrauch einschränkt [43].

2.5.6 Beeinflussung der Schwangerschaft durch Fliegen

An hypothetischen Effekten bezüglich der Beeinflussung der Feten in Zusammenhang mit Flugreisen gibt es eine große Auswahl. Zu tatsächlich untersuchten Effekten der passiven kurzfristigen Höhenexposition gibt es nur wenige Untersuchungen [6,15,20,27,34,42]. So bedarf es der Klärung, ob Fliegen unterschiedliche Auswirkungen auf den Feten je nach Schwangerschaftsalter hat, ob es zu gehäuftem Auftreten von Spontanaborten kommt, ob auch wachstumsretardierte Feten Höhenexposition kompensieren können, bzw. zu welchen Komplikationen es für Feten kommen kann.

Die Häufigkeit von Frühaborten ist in Zusammenhang mit privaten Flugreisen in der zivilen Luftfahrt, im Gegensatz zu früheren Meinungen, nicht gehäuft zu beobachten [6,15]. Allerdings wird ein Spontanabort, falls vorkommend, von der Schwangeren meist mit der unternommenen Flugreise in Verbindung gebracht und hat somit psychischen Charakter. Die Strahlenbelastung, welche abhängig von Art und Länge des Fluges (s. Kap. 2.7) ist, sollte bis zum Abschluß der Organogenese so gering wie möglich gehalten werden. Generell besteht aber kein medizinischer Einwand gegen nötige Flugreisen während des ersten Trimenons.

Aufgrund der anderen Verhältnisse in der Sauerstoffverfügbarkeit und -ausnutzung beim Feten, treten, wie bereits beschrieben, in Höhen der üblichen Reiseflughöhe bei gesunder Mutter-Kind-Einheit keine negativen gesundheitlichen Effekte auf. Diese Höhen sind auch nicht als Auslöser für einsetzende Wehen, in deren Verlauf es zur Geburt käme, zu sehen. Hat der Geburtsvorgang aber, aus welchen Gründen auch immer, während der Flugreise begonnen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es durch die milde Hypoxie in manchen Fällen zu einer Beschleunigung des Geburtseignisses kommen könnte. Grund hierfür könnte auch sein, dass die Uteruskontraktionen den Blutfluß in Plazenta und Uterusmuskulatur einschränken [42].

Schwangere mit vorbestehenden schweren Allgemeinerkrankungen oder mit bekannten Schwangerschaftskomplikationen wie beispielsweise vorzeitiger Wehentätigkeit mit isthmo-zervikaler Insuffizienz, Plazentaanomalien oder EPH-Gestose sollten die Notwendigkeit einer Flugreise interdisziplinär mit ihren behandelnden Ärzten abklären, um eine gesundheitliche Gefährdung für Mutter und Feten möglichst gering zu halten bzw. auszuschließen.

Freeman et al. [20] verglichen 222 schwangere Frauen ab der 20. Schwangerschaftswoche miteinander, von denen 53 % während ihrer Schwangerschaft Flugreisen unternahmen. Die Vergleichsgruppe von 47 % unternahm keine Flugreisen. Sie konnten feststellen, dass es keine signifikanten Unterschiede im Outcome der Neugeborenen

zwischen den Schwangeren, welche eine Flugreise unternahmen und den Schwangeren, die keine Flugreise unternahmen, gab.

Die Flugreisenden brachten im Vergleich zu den nicht-flugreisenden Schwangeren ihre Kinder im Mittel in der 39. bzw. in der 38. Schwangerschaftswoche zur Welt. Frühgeburten gab es bei 9 % bzw. 14 % der Geburten, das Geburtsgewicht betrug im Mittel 3.379 g bei flugreisenden Schwangeren bzw. 3.273 g bei nicht-flugreisenden Schwangeren. Die Rate vaginaler Blutungen betrug 2 % bzw. 5 %, die Neugeborenen waren zu 13 % bzw. 16 % intensivpflichtig und die Rate der Präeklampsie betrug im Vergleich von flugreisenden zu nicht-flugreisenden Schwangeren 5 % bzw. 6 % [20]. Im Hinblick auf die Zahlen dieser Arbeit hätten Flugreisen während der Schwangerschaft sogar protektiven Charakter.

Auch die Ergebnisse dieser Untersuchung legen nahe, obwohl ein relativ kleines Kollektiv umfassend, dass Flugreisen für Schwangere und ihre Feten nicht mit einem erhöhten Risiko für Komplikationen einhergehen. Sie untermauern ebenfalls die These, dass Fliegen bei komplikationsloser Schwangerschaft für Mütter und Feten sicher ist.

2.5.7 Notfälle an Bord eines Flugzeuges

Mit zunehmender Anzahl Flugreisender und kontinuierlich steigendem Durchschnittsalter der Passagiere wird generell die Zahl der Erkrankungsfälle an Bord von Flugzeugen zunehmen.

Erhöhtes Lebensalter sowie veränderte Umgebungsbedingungen im Flugzeug wie verminderter Luft- und Sauerstoffpartialdruck können zur akuten Verschlimmerung, teils vorbestehender Erkrankungen, im Verlauf eines Fluges führen. Zentral abrufbare, aussagekräftige Daten über die Häufigkeit und Schwere von medizinischen Zwischenfällen gibt es nicht. Bei vielen Fluggesellschaften existiert keine Dokumentationspflicht. Man geht davon aus, dass weltweit Zwischenfälle nur zu 17 % erfasst werden [33]. Bei den deutschen Fluggesellschaften haben lediglich Condor, Germanwings und Eurowings standardisierte Zwischenfallberichte für medizinische Notfälle. Die medizinischen Notfälle an Bord eines Flugzeugs lassen sich aus Ermangelung an verlässlichen Zahlen nur hochrechnen. Bei einem von ca. 5.000 Passagieren kommt es zu einem medizinischen Zwischenfall, bei dem ein Arzt an Bord ausgerufen werden muss. Dies bedeutet bei jährlich zwei Milliarden Flugreisenden ca. 440.000 Zwischenfälle. Der häufigste medizinische Handlungsbedarf entsteht in 26 % durch Kreislaufkollaps, respiratorische Probleme liegen beispielsweise bei 13,5 %. Der geringste aufgeführte Anteil an medizinischen Zwischenfällen an Bord eines Flugzeuges machen mit 2,45 % allergische Reaktionen aus [33].

Geburtshilfliche Notfälle sind aufgrund des geringen Vorkommens nicht in dieser Auflistung enthalten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus unserer Befragung der großen deutschen Fluggesellschaften (Kap. 3). Geburten kamen nur in seltenen Fällen vor. Uns sind 13 Fälle bekannt, die teilweise auf 40- bzw. 20-jährige Fluggeschichte zurückgehen. Die Daten, welche es über Geburten in Flugzeugen deutscher Airlines gibt, sind lückenhaft und werden aus der Erfahrung mit den von uns versandten Fragebögen nur selten und äußerst bruchstückhaft offengelegt. Es gibt keine Möglichkeit, die Angaben zu verifizieren. So gibt es auch keine Erklärungen zu den näheren Umständen der Geburt wie beispielsweise Schwangerschaftswoche, Entbindungsdauer, Fluglänge, eventuell vorbestehenden gesundheitlichen Problemen oder der Gesundheit des entbundenen Kindes. Wenn überhaupt wird Auskunft darüber gegeben, ob Geburten an Bord vorkamen oder nicht. Eine mögliche Ursache für dieses Vorgehen könnte darin bestehen, dass es keine Dokumentationspflicht für medizinische Notfälle an Bord von Flugzeugen in Deutschland gibt. Würden diese Notfälle zentral, beispielsweise vom Luftfahrtbundesamt in Braunschweig, erfasst, könnte im Hinblick auf schwangere Passagiere aktualisierte Beförderungsbestimmungen erlassen, Notfallmanagement festgelegt, Schulungen des fliegenden Personals verbessert und Notfallkoffer zielgerichteter ausgestattet werden.

2.5.8 Reiseplanung

Generell ist die Reisefähigkeit für schwangere Frauen gegeben. Im ersten Trimenon ist die Reise teils durch Übelkeit beeinträchtigt, Komplikationen und fehlende Überwachungsmöglichkeit können eine Reise im ersten und dritten Trimenon erschweren. Bei Blutungen, vorzeitigen Wehen und Risikoschwangerschaften ist von einer (Flug-)Reise abzuraten. Bei der Planung einer Reise sollte darauf geachtet werden, dass adäquate medizinische Versorgung innerhalb von zwei bis drei Stunden möglich ist.

Die Risikoabwägung der Reiseplanung erfordert die Beantwortung einiger Fragen. Sie sollten gemeinschaftlich mit dem behandelnden Arzt besprochen werden. In welchem Zustand ist die medizinische Infrastruktur entlang der geplanten Reiseroute, ist eine zeitgerechte Schwangerschafts-Vorsorgediagnostik durchgeführt worden, gab es Komplikationen in früheren Schwangerschaften, wie ist die fachärztlich-geburtshilfliche Versorgung im Reiseland und ist die Möglichkeit zu technisch adäquater Sectio und Frühgeborenenversorgung gegeben?

Vor einer geplanten Reise sollte im Sinne der gesundheitlichen Sicherheit für Mutter und Ungeborenes eine spezielle Vorsorge erfolgen. Reguläre Schwangerschafts-Vorsorgeuntersuchungen sollten durchgeführt und eventuell vorgezogen werden, falls

sie während der Reise fällig würden. Unklare Befunde sind vor jeder Reise abzuklären. Je nach Infrastruktur des Reiselandes ist die eigene Medikation (Folsäure, Jod, Magnesium, Fenoterol) mitzunehmen. Auf die während einer Schwangerschaft kontraindizierten Medikamente ist vom behandelnden Arzt hinzuweisen.

Für den Impfschutz gilt allgemein, dass unabhängig von einer Reise Impfungen mit einem Totimpfstoff unproblematisch sind. Sinnvoller wären Impfungen vor einer Schwangerschaft. Reisebedingte Impfungen wie Hepatitis A und B sind dennoch wünschenswert. Lebendimpfstoffe sind in der Schwangerschaft generell kontraindiziert. Eine Ausnahme stellt das Gelbfieber dar. Hier ist die Impfung im ersten Trimenon wegen eventueller Abortinduktion kontraindiziert. Danach ist die Impfung möglich, wenn die Infektionsgefahr das Impfrisiko überwiegt. Liegt bei der schwangeren Reisenden keine Rötelnimmunität vor, ist unter Umständen von einer Reise abzuraten [30].

Von einer Reise in Malariagebiete sollte dringend abgeraten werden, da Malaria bei Schwangeren oftmals dramatischer oder tödlich verläuft. Die Malariamedikamente Chloroquin und Proguanil gelten als schwangerschaftsverträglich, der Schutzeffekt nimmt jedoch weltweit rasch ab. Mefloquin ist im ersten Trimenon kontraindiziert, danach aber erlaubt. Doxycyclin ist in der gesamten Schwangerschaft kontraindiziert. Als Malariatherapie ist Chinin möglich, kann aber wehenauslösenden Effekt haben. Erkrankungs- und Medikationsrisiko ist abzuwägen [30].

2.5.9 Versicherungsschutz bei Auslandsreisen

Neben den divergenten Beförderungsbestimmungen der Fluggesellschaften bedarf es auch der individuellen Klärung des Reiseversicherungsschutzes schwangerer Passagiere. Die Möglichkeiten der Reiseversicherungen für Reisende allgemein sind vielseitig. Die gesetzlichen Krankenkassen bieten bei Auslandsreisen nur einen begrenzten Versicherungsschutz, der die Behandlung in staatlichen Krankenhäusern oder von dem staatlichen Gesundheitswesen verpflichteten Ärzten im betreffenden Land beinhaltet. Zu bedenken gilt es, dass die medizinische Versorgung im Ausland nicht immer dem mitteleuropäischen Standard entspricht, so dass der Reisende im Normalfall besser ausgestattete private Krankenhäuser oder Ärzte aufsuchen wird. Für die Kosten müsste er größtenteils selbst aufkommen. Medizinische Rücktransporte aus dem Ausland übernehmen gesetzliche Krankenkassen generell niemals. Daher ist es Reisenden und im besonderen schwangeren Reisenden anzuraten, eine ergänzende private Auslandskrankenversicherung abzuschließen. Versicherungsagenturen, Reisebüros, Automobilclubs oder spezielle Anbieter von Auslandskrankenversicherungen bieten eine private Auslandskrankenversicherung an. Meist liegen die Angebote

bei ca. 20 Euro und gelten für ein Jahr, wenn der Urlaub nicht länger als sechs Wochen dauert. Die allgemeinen Versicherungsbedingungen der Anbieter sind ähnlich, unterscheiden sich aber erheblich in den Voraussetzungen für den Rücktransport. Von der Versicherungsleistung ausgeschlossen sind unter anderem Entbindungen nach der 36. Schwangerschaftswoche, Schwangerschaftsunterbrechungen und deren Folgen einschließlich Krankenrücktransport [30].

Für schwangere Flugreisende ist es allerdings wichtig zu wissen, dass trotz vollständiger Versicherung kein uneingeschränkter Rücktransport mit dem Flugzeug gewährleistet ist. Je nach Träger der Auslandsrankenversicherung wird ein Krankenrücktransport unterschiedlich bewertet. Ist eine private Versicherung der Träger, besteht Anspruch auf Kostenerstattung des Rücktransports, wenn er als „medizinisch notwendig“ erklärt wird. Ist ein Reiseversicherer Träger der Auslandsrankenversicherung, werden die Voraussetzungen für einen Rücktransport weiter gefasst. Er erfolgt dann auf Kosten der Versicherung, wenn der Rücktransport „medizinisch sinnvoll und vertretbar“ ist [30]. Für einen Rücktransport wird zunächst immer die Frage der adäquaten medizinischen Versorgung vor Ort gestellt. Da oftmals schwer beurteilbar, wird die Entscheidung immer zu Gunsten der Gesundheit des Versicherten fallen. Die meisten Versicherer transportieren schwangere Reisende im ärztlich angeordneten Notfall nur bis zur 37. Schwangerschaftswoche an ihren Wohnort zurück. Nach diesem Zeitpunkt trägt die Schwangere die Kosten für den Rücktransport im Flugzeug selbst. Je nach medizinischer Indikation gibt es verschiedene Arten des Rücktransports im Flugzeug. Hierzu soll ein Kostenbeispiel genannt werden. Ein Rücktransport im Flugzeug von den Kanaren nach Deutschland würde im Bedarfsfall, sitzend mit medizinischer Begleitung, zwischen 8.000 und 10.000 Euro kosten. Der gleiche Flug als Ambulanzflug läge bei 20.000 bis 24.000 Euro. Ein Transport von USA nach Deutschland liegt im ersten Fall bei 12.000 bis 17.000 Euro, der Ambulanzflug bei 80.000 bis 100.000 Euro. [53,65]

Vor allem bei Fernreisen kann Schwangerschaft zur Unzumutbarkeit der Reise für die Schwangere führen. Bucht eine Schwangere eine Reise, welche in Art und Ziel für Schwangere im Allgemeinen nicht zuträglich ist, entfällt der Versicherungsschutz für die gebuchte Reise. Wenn die Versicherung greifen soll, ist es entscheidend, dass das Ereignis, welches zur Unzumutbarkeit des Reiseantrittes führt, nach Buchung der Reise und Abschluß der Versicherung eintritt. Der Versicherungsschutz entfiere beispielsweise, wenn bei bestehender Schwangerschaft eine Fernreise gebucht würde und diese storniert würde, weil die vom Tropeninstitut empfohlenen Impfungen nicht durchgeführt werden können [30].

2.6 Hypoxie

2.6.1 Ursachen und Arten der Hypoxie

Hypoxie bezeichnet allgemein die Herabsetzung des O_2 -Gehaltes im Gesamtorganismus oder in bestimmten Körperregionen. Bei Störungen des Atemgaswechsels in der Lunge oder Störungen des Atemgastransports im Blut kommt es zu einer mangelhaften O_2 -Versorgung der Organe und zu Gewebhypoxie oder Gewebeanoxie, wenn der O_2 -Bedarf nicht mehr durch das O_2 -Angebot gedeckt werden kann. Sowohl das Ausmaß des O_2 -Mangels als auch die Zeitspanne, während der ein O_2 -Mangel auftritt, bedingen die Reaktionen des Organismus. Hypoxie lässt sich in drei verschiedene Kategorien unterteilen. Akute Hypoxie tritt beispielsweise bei plötzlichem Druckabfall im Flugzeug oder beim Ausfall von Atemgasgeräten auf. Schnell einsetzende Hypoxie wird durch plötzlichen Höhenanstieg, wie beim Aufstieg in einer Bergbahn oder dem Steigflug eines Flugzeuges, hervorgerufen. Zu chronischer Hypoxie kommt es beispielsweise bei längerfristigen Aufenthalten in großen Höhen.

Hypoxie kann aufgrund der Komplexität des O_2 -Transportsystems verschiedenste Ursachen haben. Bei der histotoxischen Hypoxie ist die Zellatmung durch Noxen blockiert. Spezifische Ursachen können neben einer Vergiftung oder Verminderung der Atemenzyme die Noxen Kohlenmonoxid, Alkohol oder Zyanide sein.

Unter hypämischer Hypoxie versteht man die Herabsetzung der O_2 -Transportkapazität des Blutes durch Verminderung des Hämoglobingehaltes oder durch Beeinträchtigung des O_2 -Bindungsvermögens. Jede Herabsetzung der O_2 -Kapazität des Blutes als Folge von Blutverlusten oder CO-Vergiftung führt zu einer Abnahme der O_2 -Konzentration im arteriellen Blut. Bei gleich bleibendem O_2 -Bedarf für die Gewebe ergeben sich sehr niedrige O_2 -Konzentrationen bei der Kapillarpassage. Der zugehörige O_2 -Partialdruck kann als Folge am venösen Kapillarende Werte erreichen, die keine ausreichende O_2 -Diffusion zu den Orten des O_2 -Verbrauchs mehr ermöglichen.

Stagnierende Hypoxie ist zum einen bedingt durch eine Reduktion des Herzzeitvolumens. Mögliche Ursachen hierfür können Herzinsuffizienz, Schock, anhaltende Druckbeatmung, Beschleunigung oder pulmonale Embolie sein. Zum anderen kann die stagnierende Hypoxie aus einer Reduktion des regionalen oder lokalen Blutflusses resultieren. Als spezifische Ursachen sind hier externe Umgebungstemperaturen, Körperlageänderungen, Stauungen, Hyperventilation, Embolien durch Thrombosen der Gasbläschen und zerebrovaskuläre Ereignisse zu nennen.

Hypoxische Hypoxämie kommt durch Reduktion des alveolären O_2 -Partialdrucks zustande. Ursachen hierfür können einerseits reduzierter O_2 -Partialdruck bei der Inspi-

ration, wie bei akuter Höhenexposition, verschiedene Asthmaformen, Hypoventilation oder Atemgasgemische mit unzureichendem O_2 -Partialdruck sein. Andererseits kann eine hypoxische Hypoxämie durch Reduktion der Gasaustauschfläche zustande kommen. Mögliche Gründe hierfür können Pneumonie, Ertrinken, Emphysem, Pneumothorax oder angeborene Herzfehler sein. Außerdem können Diffusionsbarrieren zu hypoxischer Hypoxämie führen. Für die höhenbedingte hypoxische Hypoxämie in der Luftfahrt ist ein reduzierter O_2 -Partialdruck bei der Inspiration für die Reduktion des alveolären O_2 -Partialdruckes verantwortlich [17]. Bei Höhenexposition über 3.048 m führt die höhenbedingte Hypoxie zu deutlichen Veränderungen im Organismus. Der inspiratorische O_2 -Partialdruck fällt von 160 mmHg auf 110 mmHg, der alveoläre O_2 -Partialdruck fällt von 103 mmHg auf 61 mmHg. Die Sättigung des Hämoglobins liegt in dieser Höhe bei 90 %. Diese Werte gelten für akute Höhenexposition. Davon zu unterscheiden sind mittel- und langfristige Aufenthalte in großen Höhen, die über physiologische Anpassungsmechanismen zur Höhenakklimatisation führen.

2.6.2 Hypoxiewirkungen

Energiestoffwechsel

Der Atemgaswechsel innerhalb eines Zellverbandes bei der biologischen Oxidation der Nährstoffe wird als Gewebeatmung bezeichnet. Der Sauerstoff wird aus dem Kapillarblut von den Zellen aufgenommen und im oxidativen Stoffwechsel verbraucht. Kohlendioxid wird als Stoffwechselprodukt wieder ins Kapillarblut abgegeben. Jede einzelne Körperzelle benötigt zur Aufrechterhaltung ihrer Struktur und Funktionsbereitschaft, sowie zur Durchführung ihrer Funktionen eine bestimmte Menge an Energie. Sie wird unter Normalbedingungen hauptsächlich über den oxidativen Abbau der Nährstoffe gewonnen. Voraussetzung für die Energiegewinnung im aeroben Stoffwechsel ist die ausreichende Konzentration von Substraten, wie Kohlenhydraten, Eiweißen und Fetten, sowie von molekularem Sauerstoff in der Zelle. Die anaerobe Energiegewinnung erfolgt über die Glykolyse. Dieser Weg der Energiegewinnung ist deutlich unökonomischer. Im anaeroben Stoffwechsel muß die Zelle zur Gewinnung gleicher Energiemengen ca. 15mal mehr Glucose umsetzen, als unter aeroben Bedingungen. Beim oxidativen Abbau von 1 mol Glucose erhält man eine Energiemenge von 689 kcal (2883 kJ), bei der Glykolyse sind es 50 kcal (208 kJ) [47]. Die ersten Schritte der Glykolyse finden im Zytoplasma statt. Die Oxidation ist in den Mitochondrien lokalisiert. In den Mitochondrien sind Enzyme für Citratzyklus, Atmungskette und oxidative Phosphorylierung sowie Enzyme für den Abbau der Fettsäuren und verschiedener Aminosäuren vorhanden. Pyruvat, Fettsäuren und Aminosäuren werden aus dem Zytoplasma in den Matrixraum der Mitochondrien transportiert. Hier werden sie über spezifische Stoffwechselwege zu

Substanzen abgebaut, die in den Citratzyklus gelangen. Die Fettsäuremoleküle werden über die β -Oxidation schrittweise zu Acetyl-CoA abgebaut, das in den Citratzyklus gelangt oder zur Synthese von Fettsäuren benötigt wird. Aus Pyruvat wird im Matrixraum über die oxidative Decarboxylierung Acetyl-CoA, das unter Normalbedingungen fast vollständig im Citratzyklus abgebaut wird. Beim Stoffwechsel der Aminosäuren entstehen im Matrixraum Kohlenwasserstoffverbindungen; sie können an verschiedenen Stellen in den Citratzyklus eingeschleust werden.

Im Citratzyklus entstehen über drei Dehydrierungsreaktionen NADH_2 -Moleküle und Succinat. Sie gelangen durch Diffusion an die innere Mitochondrienmembran, wo sie auf die Enzyme der Atmungskette und der oxidativen Phosphorylierung treffen. NADH wird mit Hilfe von Flavin-Mono-Nukleotid (FMN) und Succinat mit Hilfe von Flavin-Adenin-Dinucleotid (FAD) oxidiert. Hierbei werden Elektronen freigesetzt, die über eine Elektronentransportkette zum Cytochrom-Oxidase-Komplex gelangen, von dem sie auf molekularen Sauerstoff übertragen werden. Durch den Elektronentransport entsteht Energie, die dafür sorgt, dass Protonen aus dem Matrixraum der Mitochondrien gepumpt werden. Der so entstandene Protonengradient ermöglicht verschiedene energieverbrauchende Prozesse. Beim Rückfluß der Protonen in den Matrixraum kommt es über die ATP-Synthetase zur Bildung von ATP.

Für 1 NADH -Molekül können 3 ATP-Moleküle, für 1 dehydriertes FADH_2 -Molekül können 2 ATP-Moleküle entstehen. Das Verhältnis von ATP-Produktion zu Sauerstoffverbrauch beträgt 3 bzw. 2. Das bedeutet, dass für die Bildung von 3 Molen ATP ca. ein bzw. zwei Grammatom Sauerstoff verbraucht werden.

Bei unzureichender O_2 -Versorgung kann der Energiebedarf der Gewebe nur teilweise und kurzfristig durch gespeicherte Energiereserven (ATP, Kreatininphosphat) und anaerobe Glykolyse gedeckt werden, da der nun erhöhte Bedarf der Zellen an Glucose nur selten über längere Zeit gedeckt werden kann und das vermehrt gebildete Lactat nur verzögert aus den Zellen abtransportiert oder zur Glykogenbildung verwendet werden kann. Folge der steigenden Lactatkonzentration in Gewebe und Blut ist bei deutlichem O_2 -Mangel eine nichtrespiratorische Acidose, die zu starken Veränderungen des Zellstoffwechsels führen kann [47].

Hypoxiesensitivität der Gewebe

Die Größe des O_2 -Bedarfs eines Gewebes wird vom Funktionszustand der einzelnen Zellen bestimmt. Der O_2 -Verbrauch \dot{V}_{O_2} einzelner Organe errechnet sich nach dem Fickschen Prinzip aus der Durchblutungsgröße \dot{Q} und der Differenz der O_2 -Konzentrationen im zufließenden arteriellen und abfließenden venösen Blut (avD_{O_2}) nach der Gleichung:

$$\dot{V}_{O_2} = avD_{O_2} \cdot \dot{Q} \quad (2.14)$$

Unter den Bedingungen körperlicher Ruhe besteht für Herzmuskelgewebe, Großhirnrinde, Leber und Nierenrinde großer O_2 -Verbrauch. Im Skelettmuskelgewebe, Milz und weißer Hirnsubstanz werden niedrige Werte für den O_2 -Verbrauch nachgewiesen [17,47]. Zudem führt jede Leistungssteigerung eines Organs zu einer Zunahme des Energieumsatzes und einer Erhöhung des O_2 -Bedarfs seiner Zellen.

Die Strukturen des zentralen Nervensystems reagieren besonders sensibel auf Hypoxie, da sie nur über eine sehr geringe glykolytische Stoffwechselkapazität verfügen. Je komplizierter die kognitiven und motorischen Anforderungen an die einzelnen Hirnabschnitte sind, desto eher werden sie durch Hypoxie beeinträchtigt. Bei plötzlicher Gewebeanoxie setzen im Bereich der Großhirnrinde nach vier bis sechs Sekunden erste Funktionsstörungen ein. Nach 10-20 Sekunden kommt es zu vollständiger Lähmung und Bewußtseinsverlust, nach 20-30 Sekunden zur Nulllinie im EEG. Nach drei bis fünf Minuten sind die Schäden irreversibel. Eine Wiederbelebung ist bis zu acht bis zehn Minuten nach vollständiger Ischämie möglich [17].

Funktionelle Änderungen bei Atmung und Herz-Kreislauf

Bis zu einer Höhe von 3.658 m steigt die Ventilation nur geringfügig an [16]. In 5.000 m Höhe liegt das Atemzugvolumen um 10 %, in 6.000 m aber bereits um 100 % über vergleichbaren Werten auf Meereshöhe. Ab ca. 7.500 Höhenmetern wird die Atmung arrhythmisch und flach, die Lungenventilation verringert sich schnell, es droht Bewusstseinsverlust.

Die Herzfrequenz beträgt beim Erwachsenen je nach Alter, Geschlecht und körperlichem Zustand zwischen 60 und 80 Schlägen pro Minute. Ab 2.000 m beginnt die Herzfrequenz in Ruhe langsam anzusteigen. In 6.000 m Höhe werden Werte zwischen 90 und 120 Schlägen pro Minute erreicht [16]. Mit weiter zunehmender Höhe steigt die Herzschlagfrequenz immer weniger an. Bei körperlicher Belastung oder im Stehen ist ein deutlich größerer Anstieg feststellbar. Zudem ist die Herzfrequenz von der Geschwindigkeit des Höhenaufstiegs abhängig. Das Herzzeitvolumen ändert sich nur geringfügig.

Der mittlere arterielle Blutdruck steigt mit zunehmender Höhe geringfügig an. Bei längerfristiger hypobarer hypoxischer Hypoxie kann es über den Euler-Lilijestrand-Mechanismus zur Vasokonstriktion in der Lungenstrombahn und infolge dessen zum Lungenödem kommen.

Für die zerebrale Durchblutung ergibt sich aus der Kombination von vasodilatatorischem Effekt der Hypoxie und vasokonstriktorischem Effekt der Hypokapnie ein leichter Anstieg.

Im Myokard kommt es schon ab einer Abnahme der O_2 -Sättigung um 5 % zu koronarer Vasodilatation und Zunahme der Durchblutung. Je nach Ausmaß der Hypoxie kann die Myokarddurchblutung um das zwei- bis dreifache erhöht sein [17].

2.6.3 Anzeichen und Symptome

Je nach Aufenthaltshöhe und sich daraus ergebendem Grad hypobarer Hypoxie können eine Vielzahl an Symptomen, das Zentralnervensystem betreffend, auftreten. Zwischen null und 1.823 Höhenmeter gilt der Hypoxiegrad als indifferent. Die O_2 -Sättigung liegt zwischen 90 % und 98 %. In einer Höhe von 1.823 m bis 5.470 m ist die Hypoxie bei einer O_2 -Sättigung von 80 % bis 90 % kompensierbar. Es können subjektive und objektive Symptome wie Schläfrigkeit, Urteilsschwäche, verschlechterte Koordination und verringerte Leistungsfähigkeit auftreten. Zwischen 5.470 m und 7.293 m liegt die O_2 -Sättigung des Hämoglobins zwischen 70 % und 80 %. Die Hypoxie ist nicht mehr vollständig kompensierbar. In Untersuchungen mit Piloten kommt es zu verschlechterter Flugkontrolle, verschlechterter Handschrift, verschlechtertem Sprechvermögen und verminderter Koordination. In dem Höhenbereich von 7.293 m bis 9.117 m kommt es bei einer O_2 -Sättigung von 60 % bis 70 % zu kritischer Hypoxie als Folge derer Kreislauf- und ZNS-Versagen, Krämpfe, kardiovaskulärer Kollaps und Tod auftreten [17].

Zu den von Piloten beschriebenen Hypoxiesymptomen zählen Tunnelsehen, erschwerte Akkommodation, Muskelschwäche, vermindertes Schmerzempfinden, Schwindel, Stottern, Zyanose, Verlust der Selbstkritik, übersteigertes Selbstbewusstsein, schnelle und flache Atmung sowie Euphorie [17].

2.6.4 Hypoxietoleranz

Die Hypoxietoleranz des Einzelnen ist von konstitutionellen, konditionellen und gesundheitlichen Faktoren abhängig. Sie kann durch Höhenttraining gesteigert werden. Mit zunehmender Höhe und steigendem Hypoxiegrad sinken die Selbst- bzw. Fremdrettungszeiten. Selbstrettungszeit ist die Zeit vom Beginn einer unzureichenden O_2 -Versorgung bis zum Eintreten von Handlungsunfähigkeit oder Bewusstlosigkeit. Diese Zeitspanne umfasst die Zeit der nicht bemerkten unzureichenden O_2 -Versorgung und die Zeit nach dem Bemerkten des persönlichen Warnsignals. Die Selbstrettungszeit wird beeinflusst

durch die Kabinenhöhe in der der O_2 -Mangel eintritt, die Erfahrungen mit Hypoxie, Arbeitsbelastung und allgemeine physische Verfassung.

Aufenthaltshöhe	Selbstrettungszeit
5.486 m	20-30 min
6.706 m	10 min
7.620 m	3-5 min
8.534 m	2,5-3 min
9.144 m	1-2 min
10.668 m	30-60 s
12.192 m	15-20 s
13.106 m	9-12 s
15.240 m	9-12 s

Tabelle 2.1: Selbstrettungszeiten in Abhängigkeit zur Höhe [n. 17]

Wenn der Pilot einen O_2 -Mangel erkennt, so ist für Passagierflugzeuge ein Notsinken von der Reiseflughöhe auf eine Sicherheitshöhe von 4.000 m bis 6.000 m und das Anlegen einer Sauerstoffmaske vorgesehen. Im militärischen Bereich ist ein Umschalten des O_2 -Reglers auf Not-Versorgung, Prüfen der Masken- und Schlauchverbindung, eine Aktivierung der O_2 -Reserve und ein schneller Abstieg unter 3.048 m vorgeschrieben [17].

2.6.5 Behandlung

Eine O_2 -Therapie kann in vielen Fällen von Hypoxie zur Verbesserung der O_2 -Versorgungsbedingungen in den Geweben führen. Ziel ist es, durch Erhöhung des inspiratorischen O_2 -Partialdruckes einen erhöhten arteriellen O_2 -Partialdruck zu erreichen. Man unterscheidet die isobare Therapie, bei der Gasgemische mit hohem O_2 -Anteil oder reinem Sauerstoff eingeatmet werden von der hyperbaren Therapie, bei der die Behandlung in Druckkammern unter Überdruckbedingungen erfolgt. Der Erfolg einer O_2 -Therapie ist bei ischämischer und anämischer Hypoxie eingeschränkt, da hier die arterielle O_2 -Konzentration durch die Erhöhung der physikalisch gelösten O_2 -Menge nur geringfügig gesteigert werden kann. Die künstliche O_2 -Zufuhr muß in jedem Fall auf die kürzest mögliche Zeit begrenzt werden, da es sonst zur O_2 -Vergiftung kommen kann [17].

2.6.6 Hyperoxie

Eine Erhöhung des inspiratorischen O_2 -Partialdruckes über 22 kPa zeigt einen sehr geringen Nutzen in Bezug auf eine zusätzliche O_2 -Bindung an Hämoglobin, das bei normalem O_2 -Partialdruck bereits zu ca. 97 % gesättigt ist. Dennoch kommt eine zusätzliche Sauerstoffatmung im Folgenden zur Anwendung. Bei einer O_2 -Voratmung vor geplanter Höhenexposition, bei militärischen Nachtflügen, beim Tauchen mit komprimierten Gasen und bei therapeutischer Beatmung. Als Grenzwerte für den inspiratorischen O_2 -Partialdruck werden beim Erwachsenen 450 mmHg (60 kPa), beim Neugeborenen 300 mmHg (40 kPa) empfohlen. Beim Überschreiten dieser Werte kann es zu toxischen Wirkungen kommen.

O_2 -Partialdruck [kPa]	O_2 -Partialdruck [mmHg]	Symptome
> 100	> 750	Zunächst Lungensymptome
> 200	> 1.510	Überwiegend ZNS-Symptome
250	1.885	1-2 h Toleranz unter Ruhebedingungen
> 600	> 4.530	Tonisch-klonische Krämpfe, Bewußtlosigkeit

Tabelle 2.2: O_2 -Partialdruckerhöhung und ihre Symptome [n.17]

Die starke Erhöhung des O_2 -Partialdruckes in den Zellen führt zu einer Beeinflussung zahlreicher Enzyme des Gewebestoffwechsels. Es kommt zur Hemmung der Oxidation von Glucose, Fructose und Brenztraubensäure. Typische Zeichen einer O_2 -Vergiftung sind Kopfschmerzen und Übelkeit bis hin zu Krämpfen und Bewusstlosigkeit. Außerdem pulmonale Störungen, die über Hustenreiz zu interstitieller Pneumonie bis zum Lungenödem führen können. Infolge eines erhöhten Vagotonus, ist das Herzzeitvolumen erniedrigt, die Gehirn- und Nierendurchblutung ist eingeschränkt. Neugeborenen darf nicht über einen längeren Zeitraum reiner Sauerstoff zugeführt werden. Es kann hierdurch zu Retinaveränderungen mit Einschränkung des Sehvermögens oder zur Erblindung kommen [17].

2.7 Strahlung

2.7.1 Strahlenexposition

Natürliche und zivilisatorische Strahlung

Als Ende der 50er Jahre mit Einführung von Düsenverkehrsflugzeugen immer größere Höhen erreicht wurden, stellte sich die Frage nach der potentiellen Gefährdung durch den Einfluss ionisierender Strahlung sowohl für fliegendes Personal als auch für Passagiere. Bis heute gibt es keine endgültige Bewertung der Strahlenexposition beim Fliegen in Bezug auf quantifizierbare Einwirkungen auf biologische Systeme.

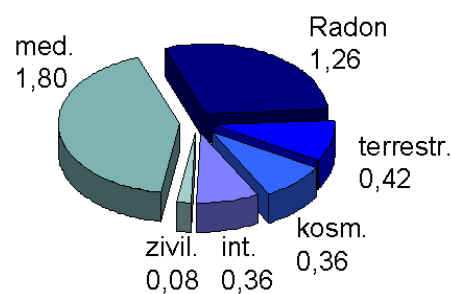


Abbildung 2.19: Mittlere effektive jährliche Äquivalentdosen der Strahlung in westlichen Industrienationen, angegeben in mSv [n.25]

Jeder Mensch ist ständiger Strahlung ausgesetzt. In westlichen Industrienationen beträgt die mittlere jährliche Strahlendosis etwa 4 mSv. Die Schwankungsbreite für Deutschland liegt zwischen 2,5 und 6,5 mSv [25]. Sie setzt sich aus einer mittleren jährlichen effektiven Äquivalentdosis von 1,5 bis 2 mSv aus zivilisatorischen und von 2,4 mSv aus natürlichen Quellen zusammen. Als zivilisatorische Strahlung werden medizinische Anwendungen wie Röntgen, nuklearmedizinische Untersuchungen und Strahlentherapie (im Mittel 1,8 mSv/a) und die Belastung aus kerntechnischen Anlagen (im Mittel 0,08 mSv/a) zusammengefasst [25].

Die natürliche Strahlung stammt aus unterschiedlichen Quellen. Die von den Strukturen der Erdoberfläche ausgehende terrestrische Strahlung beträgt im Mittel 0,42 mSv/a. Durch den Zerfall von in der Erdkruste enthaltenen langlebigen Radionukleiden (z. B. Uran 238, Thorium 232) und deren Tochterprodukten entstehen ionisierende Strahlen. Die Strahlendosis terrestrischer Strahlung variiert abhängig von geographischer Breite und geologischer Grundstruktur. Die mittlere interne Strahlenexposition von 0,36 mSv/a setzt sich aus der Aufnahme von Trinkwasser und Nahrung zusammen. Den größten Anteil an natürlicher Strahlung haben die Edelgase Radon

220 und Radon 222 (im Mittel 1,26 mSv/a). Zur natürlichen Strahlung auf der Erdoberfläche zählt zusätzlich mit einem mittleren Anteil von 0,36 mSv/a die kosmische Strahlung [25].

Kosmische Strahlung

Die Strahlendosis aus kosmischer Strahlung ist während Flügen in großer Höhe intensiver als auf Meereshöhe, da die Erdatmosphäre einen erheblichen Anteil dieser Strahlung absorbiert, ehe sie die Erdoberfläche erreicht. Für „Normalflieger“ ergeben sich daraus keine über den empfohlenen Grenzwerten liegenden Strahlenbelastungen. Schwangere „Vielflieger“, Piloten und Flugbegleiterinnen könnten allerdings ohne Anpassung ihrer Flugrouten und Flugzeiten die Grenzwerte überschreiten, innerhalb derer die Gefahr für gesundheitliche Schäden aus kosmischer Strahlung als vernachlässigbar gilt [4].

Bei kosmischer Strahlung handelt es sich um zum Teil hochenergetische Teilchen, denen die Erde von außerhalb der Magnetosphäre ausgesetzt ist. Ursprung dieser Partikel ist zum einen die Sonne als solare Strahlung zum anderen ferne Sternensysteme des Weltalls als Primärstrahlung oder galaktische Strahlung. Sie setzt sich aus 85 % Protonen, 13,5 % Alphapartikeln und 1,5 % schweren Atomkernen (C, O, Mg, Fe) zusammen und ist damit der Zusammensetzung solarer Strahlung sehr ähnlich. Primärstrahlung gilt mit 10¹³ MeV im Gegensatz zur solaren Strahlung als besonders energiereich. Daher macht sich Solarstrahlung hauptsächlich in Schichten über 20.000 m bemerkbar. Primärstrahlung führt über ein Kaskadensystem in der Atmosphäre zu einer deutlichen Abschwächung, bis sie auf die Erde trifft [17].

Die Intensität kosmischer Strahlung ist vor allem von Flughöhe und geographischer Breite abhängig. Zusätzliche Faktoren können „Solare Zyklen“ oder „Solar Flares“ sein [17]. Wesentlichste Variable der kosmischen Strahlung im Flugverkehr ist die Flughöhe. Nach dem Start nimmt die gemessene Strahlung zuerst einmal durch den Abfall der terrestrischen Strahlung bis 1.000 m ab. Danach steigt die kosmische Strahlung linear bis ca. 20.000 m an. Auf einer Reiseflughöhe von 12.000 m bei Unterschalldüsenflugzeugen ist die Dosis der kosmischen Strahlung 100 - 200 mal größer als auf der Erdoberfläche [17]. In 12.000 m beträgt die aus dem Kaskadensystem der Primärstrahlung hervorgehende Neutronenstrahlung 50 %, während man auf der Erdoberfläche nur 3 % ihres Gesamtwertes mißt. Die geographische Breite ist hinsichtlich der Intensität kosmischer Strahlung ebenfalls von großer Bedeutung. Die Abschirmwirkung des Erdmagnetfeldes, der so genannte van Allen-Gürtel, ist am geomagnetischen Äquator am größten [17]. Die Teilchenflußgröße ist an den Polen um 10 - 20 mal höher als am Äquator. Bei gleicher Höhe nimmt die Strahlengröße von ca. 15° Nord kontinuierlich zu, um bei ca. 50 - 55° Nord ihr Maximum mit der doppelten Ortsdosisleistung zu

erreichen. Bis zum geomagnetischen Nordpol bleiben die Werte dann konstant. Gleiches gilt für die Südhalbkugel. Praktisch bedeutet dies eine höhere Strahlenbelastung für Langstreckenflüge, deren Flugroute über die Pole geht. Zudem summiert sich die Strahlung auf diesen Flügen durch die längeren Flugzeiten [17,68].

Zusätzlich zur normalen kosmischen Strahlung können solare Zyklen und „Solar Flares“ zu kurzfristiger deutlicher Erhöhung der Strahlendosis führen. Solare Zyklen wiederholen sich alle 11 Jahre. Der Ausstoß niederenergetischer subatomarer Partikel wird als Solarwind bezeichnet. Starker Solarwind führt zu starken Magnetfeldveränderungen, die eine höhere Ablenkung galaktischer Strahlung bedingen. Minimaler Solarwind hingegen führt zu maximaler kosmischer Strahlung. In den für die zivile Luftfahrt bedeutsamen Höhen zwischen 9.000 m und 13.000 m kann es daher zu einer kurzfristigen Erhöhung der Strahlenintensität um bis zu 60 % kommen [17].

Magnetische Störungen auf der Sonne, die zu explosionsartiger Aussendung von Partikeln und Strahlung führen, sind die sogenannten „Solar Flares“. Die Strahlung kann sich hier in einem Zeitraum von mehreren Stunden bis zu einem Tag um das 100fache des Ausgangswertes erhöhen [17]. Vor allem die nördlichen Breitengrade sind hiervon betroffen. Würde ein Flugzeug in „Solar Flares“ geraten, könnte sich auch in normalen Flughöhen eine erhebliche Zunahme ionisierender Strahlung ergeben, die einen Not-sinkflug in deutlich niedrigere Flughöhen zur Folge hätte, um die Strahlenbelastung für Passagiere und fliegendes Personal in Grenzen zu halten. Die „Concorde“ war in ihrer über 20-jährigen Geschichte zu jeder Zeit mit einem Meßsystem zur Erfassung der Strahlendosen ausgerüstet, das jedoch niemals eine deutliche Erhöhung der Grundstrahlung anzeigte [4].

Internationale Kommissionen haben Empfehlungen zur Höhe der Strahlendosis im Flugverkehr gegeben. Diese wurden auf Länderebene zu Richtlinien umgesetzt. Nach Messungen der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung und der Lufthansa wurde die mittlere Strahlenexposition des fliegenden Personals auf 3-5 mSv/a festgelegt. Für die Normalbevölkerung wird eine jährliche Exposition von 1 mSv/a von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz empfohlen, innerhalb derer es keine nachweisbare Gefahr für Strahlenschäden gibt [17]. Bei Schwangeren gilt dieser Wert zeitlich begrenzt auf 40 Schwangerschaftswochen. Schwangere Crewmitglieder dürfen eine Strahlendosis von 1 mSv/a nicht überschreiten, so dass sie ab Bekanntgabe ihrer Schwangerschaft größtenteils vom Flugdienst befreit und als Bodenpersonal eingesetzt werden [17]. Oben genannte Richtwerte liegen deutlich unterhalb der Werte von denen eine nachgewiesene gesundheitliche Gefahr ausgeht. 1996 hat die Europäische Union im Rahmen der übergeordneten Euratom-Gesetzgebung beschlossen, das gesamte fliegende Personal als „beruflich strahlenexponiert“ einzustufen. Hier werden

auch die besonderen Maßnahmen für Mitglieder des fliegenden Personals geregelt, wenn ihre jährliche Strahlenexposition 1 mSv überschreitet. So besteht die Verpflichtung, die Strahlenexposition des fliegenden Personals zu bestimmen, Flugeinsatzpläne zur Minimierung der Gesamtstrahlenexposition auszuarbeiten, die Beschäftigten über potentielle Gesundheitsrisiken durch Strahlung zu informieren sowie schwangere Flugbegleiterinnen besonders zu schützen [4]. Für Kurzstreckenflüge gilt pro Stunde eine mittlere Strahlendosis von 0,001-0,003 mSv, für Langstreckenflüge liegen die Werte aufgrund größerer Höhe und anderer Flugroute bei 0,005-0,008 mSv pro Stunde [68]. Für einen Transatlantikflug von 10 Stunden ergäbe sich aus diesen Werten eine Strahlenbelastung von 0,08 mSv. Dies entspräche einer wöchentlichen Dosis von natürlicher und zivilisatorischer Strahlung. Hinsichtlich der errechneten Werte wird deutlich, dass fliegendes Personal zur Einhaltung klarer Arbeitspläne verpflichtet werden muss, um innerhalb der vorgegebenen Richtwerte zu liegen.

Für Schwangere ist der Wert von 1 mSv sicherlich ein guter Richtwert, um für „Vielfliegerinnen“ zu errechnen, in wieweit noch Flüge im Rahmen empfohlener Strahlenwerte möglich sind. Das Fliegen während der Organogenese sollte dennoch so gering als möglich gehalten werden, um schädigende Strahlenwirkungen so weit als möglich auszuschließen. Ansonsten gibt es aber unter dem Aspekt der Strahlenexposition keine rationale Begründung, Schwangeren von gelegentlichen Flugreisen abzuraten.

2.7.2 Biologische Auswirkungen

Ionisierende Strahlen haben das Potential der Veränderung oder Zerstörung von Strukturen in der lebenden Zelle. Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang Veränderungen an der DNA, als Träger der Erbinformation zu. Je nach Strahlenintensität kann es zum Tod der betroffenen Zellen oder zu einer Veränderung ihrer Erbsubstanz kommen, wenn zelleigene Reparaturmechanismen nicht in der Lage sind, fehlerfrei oder vollständig zu reparieren. Generell werden Wirkungen kleiner und hoher Strahlendosen unterschieden. Bei niedrigen Strahlendosen treten biologische Effekte bei zufälligen, einzelnen Strahlentreffern in der Zelle auf. Sie werden als „stochastische“ Wirkungen bezeichnet. Kennzeichnend für „stochastische“ Wirkungen ist, dass sie keine Schwellendosis haben, d. h. nur für eine Dosis von Null ist auch die „stochastische“ Wirkung Null. Folge der „stochastischen“ Strahlenwirkung kann neben genetischen Mutationen das erhöhte Neuauftreten von Karzinomen sein. Möglicherweise können solche Veränderungen der Erbsubstanz erst in der nächsten oder den folgenden Generationen auftreten [17].

Im Gegensatz dazu stehen die „nicht-stochastischen“ Wirkungen, die durch besonders hohe Dosen die Zellstruktur zunehmend beeinträchtigen oder zum Zelltod führen. „Nicht-stochastische“ Risiken treten definitionsgemäß erst über einer Größenordnung von 20 mSv/a auf. Da es sich bei der Strahlenexposition des fliegenden Personals um einen Niedrigdosisbereich handelt, können „nicht-stochastische“ Wirkungen hier ausgeschlossen werden [17].

Unter normalen Flugbedingungen gilt für schwangere wie auch für nicht-schwangere Flugpassagiere ein vernachlässigbares Risiko für direkte und unmittelbare somatische Schäden aus kosmischer Strahlung. Mit hoher Sicherheit gibt es keine genetischen Schäden oder unmittelbare Einflüsse auf die Embryonalentwicklung, so dass Schwangere im Hinblick auf die Strahlenbelastung bedenkenlos gelegentliche Flugreisen unternehmen können.

3 Ergebnisse

Deutsche wie auch internationale Fluggesellschaften divergieren in ihren Beförderungsbestimmungen für schwangere Passagiere erheblich. Eine wissenschaftliche Basis für diese Unterschiede ist nicht erkennbar. Um die von den verschiedenen großen deutschen Airlines angegebenen Richtlinien zur Beförderung Schwangerer übersichtlich darstellen zu können und den Umgang der deutschen Airlines mit schwangeren Flugreisenden zu verdeutlichen, wurde im April 2005 ein zweiseitiger Fragebogen (Abb. 6.1, 6.2) verfasst, der an die medizinischen Dienste von zwölf großen deutschen Airlines versendet wurde.

Wir stellten Fragen zu den Richtlinien für schwangere Passagiere, Flugbegleiterinnen und Pilotinnen. Zudem erfragten wir Angaben zu der Anzahl Schwangerer Passagiere allgemein und der Häufigkeit von Geburten im Flugzeug, wie auch Vorkehrungen für geburtshilfliche Notfälle im Flugzeug und den Umgang mit kosmischer Strahlung. In der auf acht Wochen begrenzten Antwortzeit betrug der Rücklauf an uns fünf von zwölf Fragebögen (5/12). Zu einem späteren Zeitpunkt gingen keine Fragebögen mehr ein. Die Auswertung erfolgte im September 2005.

Zudem stützen sich unsere Informationen zu Beförderungs- und Attestbestimmungen der aufgeführten Fluggesellschaften auf Telefonate mit den Hotlines der jeweiligen Fluggesellschaften, Anfragen an Reisebüros und Versicherungen, sowie die direkte Durchsicht der Websites der Fluggesellschaften. Diese Daten wurden zu verschiedenen Zeitpunkten auf ihre Aktualität überprüft. Letztmalig im Januar 2007, nachdem erneut Übernahmen von Fluggesellschaften erfolgt waren (Abb. 2.14 und Abb. 2.15).

Die Auswertung der Fragebögen ergab, dass alle fünf Fluggesellschaften schwangere Passagiere in festgelegten Zeiträumen befördern. Sie liegen zwischen der 34. und der 36. Schwangerschaftswoche. Zwei der fünf Fluggesellschaften (2/5), die den Fragebogen an uns zurückgesandt haben, unterscheiden zwischen Einlings- und Mehrlingsschwangerschaften. Hier werden schwangere Passagiere mit Mehrlingsschwangerschaft bis zur 28. Schwangerschaftswoche auf Langstreckenflügen und bis zur 32. Schwangerschaftswoche auf Kurzstreckenflügen befördert. Diese Unterscheidung entfällt zum Zeitpunkt der letzten Aktualisierung im Januar 2007. Ab diesem Zeitpunkt ist uns keine deutsche Fluggesellschaft mehr bekannt, welche bei der Beförderung werdender Mütter in Bezug auf Einlings- oder Mehrlingsschwangerschaft unterscheiden würde.

Ein ärztliches Attest zur generellen Beförderung wird von einer Airline ab der 29. Schwangerschaftswoche gefordert, von einer anderen Airline ab Bestehen einer Schwangerschaft. Drei Fluggesellschaften (3/5) befördern Schwangere bis zu der von

ihnen festgesetzten Schwangerschaftswoche, ein ärztliches Attest ist nicht erforderlich. Die ab 2007 geltenden Richtlinien für Atteste wurden in Abbildung 2.15 zusammengestellt.

Alle fünf Fluggesellschaften (5/5) befreien schwangere Flugbegleiterinnen oder Pilotinnen ab Bekanntgabe einer Schwangerschaft ausnahmslos vom Dienst in der Luft. Dies steht exemplarisch für alle Fluggesellschaften in Deutschland.

Den Anteil an schwangeren Passagieren von allen pro Jahr beförderten Passagieren einer Fluggesellschaft gaben zwei Fluggesellschaften (2/5) als unbekannt an. Die verbleibenden drei Fluggesellschaften (3/5) gaben ihn, in prozentualem Anteil geschätzt, zwischen 1 % und < 5 % an.

Zu Geburten an Bord liegen uns folgende Ergebnisse vor. Bei drei Fluggesellschaften (3/5) kam es noch nie zu einer Geburt an Bord eines ihrer Flugzeuge. Eine Fluggesellschaft (1/5) hat in den 20 Jahren seit Bestehen eine Geburt zu vermelden, bei einer weiteren Fluggesellschaft (1/5) kam es im Verlauf von 40 Jahren zu 12 Geburten an Bord eines Flugzeuges ihrer Flotte.

Schulungen zu geburtshilflichen Notfällen finden bei allen fünf Fluggesellschaften statt. Vier der Fluggesellschaften (4/5) führen diese Schulungen im Jahresrhythmus durch, eine Fluggesellschaft (1/5) führt die Schulungen alle zwei Jahre durch. Notfallkoffer, speziell für Geburten ausgerüstet, führen vier der fünf Fluggesellschaften mit sich. Ein Frühwarnsystem für kurzfristige Erhöhung kosmischer Strahlung existiert bei einer der fünf Fluggesellschaften (1/5).

Wie wir feststellen konnten, basieren die Beförderungsbestimmungen für Schwangere auf teilweise seit 40 Jahren bestehenden Richtlinien der Fluggesellschaften. Dieser Zeitrahmen und die Vielfalt der Bestimmungen in Kombination mit der Zunahme des Wissens um die physiologischen Veränderungen Schwangerer und ihrer Feten bei passiver Höhenexposition im Flugzeug machten eine Vereinheitlichung und Reformierung dieser Beförderungsbestimmungen sinnvoll und wünschenswert.

4 Diskussion

Das Wissen um die physiologischen höhenbedingten Veränderungen Schwangerer und ihrer Feten hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Zahlreiche Arbeiten [3,4,5,6,9,13,15,20,27,42,43] kamen zu dem Schluß, dass Fliegen bei komplikationsloser Schwangerschaft und in Abwesenheit bereits bestehender oder zu erwartender medizinischer Probleme, unabhängig von der Schwangerschaftswoche, für Mutter und Feten sicher ist. Andere Untersuchungen [1,64] kommen zu dem Ergebnis, dass für eine gesunde Mutter und ihren Feten bei normal verlaufender Schwangerschaft, Fliegen bis zur 36. Schwangerschaftswoche unbedenklich ist. Trotz der bisher durchgeführten Untersuchungen zum Thema Schwangerschaft und Fliegen gibt es keine allgemeingültigen Richtlinien, bis zu welcher Schwangerschaftswoche Airlines schwangere Passagiere befördern. Weder international noch innerhalb Deutschlands werden durch eine zentrale Organisation generelle Richtlinien für schwangere Passagiere in der zivilen Luftfahrt erlassen. Immer noch sehen sich Schwangere diversen Richtlinien, selbst innerhalb eines relativ kleinen Landes wie Deutschland, mit einer überschaubaren Anzahl von Airlines, gegenüber.

Die bisherigen Beförderungsbeschränkungen Schwangerer haben sicherlich zum großen Teil protektiven Charakter. Geburten an Bord eines Flugzeuges sind zweifelsohne mit größeren Risiken verbunden, als in der sicheren Umgebung eines Krankenhauses mit Fachpersonal. Verständlicherweise ist den Airlines an einem reibungslosen Routineablauf im Flugverkehr gelegen. Unter Beachtung der bekannten Untersuchungen zu der Häufigkeit von Geburten [9] und dokumentierten geburtshilflichen Notfällen [34] spricht verantwortungsbewusstes Handeln der Airlines nicht gegen das Erstellen erweiterter, allgemeingültiger Beförderungsrichtlinien für schwangere Passagiere.

In Deutschland wäre das Luftfahrtfahrtbundesamt in Braunschweig die zuständige Stelle, welche die Fluggesellschaften zu einer einheitlichen Dokumentation aller medizinischen Zwischenfälle mit qualifizierter Auswertung verpflichten könnte. Auf diese Weise wären lückenlose und verlässliche Informationen über geburtshilfliche Notfälle an Bord von Flugzeugen zu erhalten, die im Umkehrschluß erweiterte allgemeingültige Beförderungsbestimmungen für Schwangere rechtfertigten.

Für die Haftungsfrage gilt, dass jede Schwangere die Verantwortung für das ungeborene Kind selbst trägt. Damit entscheidet eine schwangere Reisende individuell, ob sie sich und ihrem Ungeborenen eine Flugreise zumuten kann. Würde es bei einer unternommenen Flugreise zu gesundheitlichen Komplikationen für Mutter oder Ungeborenes kommen, so trägt die Haftung dafür die Mutter selbst. Für Ärzte, die an Bord eines

Flugzeuges ärztliche Hilfe leisten, ist die Haftungsfrage nur unzureichend geklärt. An Bord jedes Flugzeuges gilt das Haftungsrecht des Landes, unter dessen Flagge das Flugzeug registriert ist. Zusätzlich kann die Rechtsprechung des Landes, in dessen Luftraum ein medizinischer Handlungsbedarf auftritt oder dessen Staatsbürger behandelt wird, Einfluss nehmen. In Deutschland sind Ärzte und andere Hilfeleistende bei Lufthansa, Lufthansa City Line, Condor, Thomas Cook, German Wings und Eurowings in der Haftpflichtpolice der jeweiligen Fluggesellschaft mitversichert. Bei einer eventuellen Klage wären bei diesen Fluggesellschaften Prozessführung, Prozesskosten und eventuelle Schadensersatzforderungen, welche ohne grob fahrlässiges Handeln entstünden, abgedeckt. Lufthansa schließt auch grob fahrlässiges Handeln mit in ihrer Versicherungspolice ein. Aus strafrechtlicher Sicht ist aber kein Hilfeleistender abgesichert, da eine Versicherung hier nicht greift [10]. Seit 1998 ist aber keine Anklage gegen einen freiwillig hilfeleistenden Arzt dokumentiert worden [22].

Auch kommen wohl historische Gründe für die Vielzahl unübersichtlicher Richtlinien in Bezug auf schwangere Passagiere im Flugverkehr in Betracht. Mit Entwicklung und Etablierung der zivilen Luftfahrt nahmen die Beförderungszahlen der Fluggesellschaften und damit auch die Anzahl Schwangerer im Flugzeug sprunghaft zu. Die Konfrontation mit dem Thema Schwangerschaft und Fliegen hat in allen Bereichen des täglichen Lebens an Wichtigkeit hinzugewonnen. Das Wissen über die Physiologie und Pathophysiologie passiver Höhenexposition von Mutter und Feten gewann vor allem in den letzten Jahren an Stellenwert. Einen wichtigen Anfang machten Huch et al. 1986 mit ihrer Studie zu den physiologischen Veränderungen Schwangerer und ihrer Feten auf Flügen in der zivilen Luftfahrt [27]. Unter Berücksichtigung aller bekannten Ergebnisse der Untersuchungen der letzten Jahre sollte es möglich sein, einheitliche Beförderungsempfehlungen für schwangere Passagiere zu erstellen.

Mit zunehmender Anzahl und Selbstverständlichkeit schwangerer Passagiere in der zivilen Luftfahrt, sind sicherlich auch ökonomische Faktoren mit einer Vereinheitlichung von Beförderungsrichtlinien verbunden. Vereinheitlichte Richtlinien bedeuteten für die einzelne Flugreisende einen deutlich geringeren Zeitaufwand zur Informationsbündelung der individuellen Reiseplanung. Das buchende Reisebüro würde zielführender und kundenorientierter mit transparenten Bestimmungen der Airlines arbeiten. Die Airlines an sich stünden nicht unter dem Druck eines nationalen oder internationalen Vergleiches in ihren Beförderungsbestimmungen schwangerer Passagiere. Zudem entfielen die Kosten zu künftigen Reformierungen dieser Richtlinien.

Für Schwangere mit unkompliziertem Schwangerschaftsverlauf und ohne bereits bestehende oder im Verlauf anzunehmende medizinische Komplikationen ist Fliegen zu jedem Zeitpunkt der Schwangerschaft sicher [5,6,27]. Die Auslösung von Frühgeburts-

bestrebungen sind in Zusammenhang mit Ereignissen während der Flugreise nicht zu erwarten [47]. Daher besteht aus medizinischer Sicht keine Notwendigkeit, gelegentliche Flugreisen gesunder Schwangerer restriktiv einzuschränken.

Eine zukunftsorientierte, zufriedenstellende Lösung läge sicherlich in allgemein anerkannten und zentral abrufbaren Richtlinien zur Beförderung schwangerer Passagiere. Als Zusammenfassung bereits bestehender Beförderungsbestimmungen, Erfahrungen der Luftfahrtgesellschaften und medizinischem Wissen könnten folgende Bestimmungen richtungsweisenden Charakter haben.

Als Grundvoraussetzung für einheitliche, rational begründbare und protektive Beförderungsbestimmungen der Fluggesellschaften wäre es zu sehen, dass schwangere Passagiere die befördernde Fluggesellschaft von ihrer Schwangerschaft in Kenntnis setzen. Ryanair legt dies beispielsweise bereits auf ihrer Homepage fest [67].

Zur Verifizierung ist in jedem Fall der Mutterpass mitzuführen. Primär sollten schwangere Frauen aber eigenverantwortlich ihren Gesundheitszustand in Bezug auf bereits bestehende Vorerkrankungen und eventuell schwangerschaftsbedingt zu erwartende oder neu aufgetretene Erkrankungen bewerten und von ihren behandelnden Ärzten feststellen lassen. Das zur Zeit von weniger als der Hälfte der großen deutschen Airlines geforderte ärztliche Attest, stellt auch für die Zukunft eine klare Aussage über den aktuellen Gesundheitszustand, Verlauf der Schwangerschaft und Anzahl der Feten dar und sollte aus diesem Grund als Basis für allgemeine Richtlinien eingeführt werden. Die Vorlage eines solchen Attestes vor Flugantritt ist innerhalb eines definierten Zeitfensters sicherlich als sinnvoll zu werten. Die International Air Transport Association (IATA) fordert mit Beginn der 28. Schwangerschaftswoche ein ärztliches Attest [64]. Dieser Zeitpunkt sollte sinnvollerweise auf den Zeitpunkt der Lebensfähigkeit eines Ungeborenen, also die 25. Schwangerschaftswoche vorverlegt werden, um die in 36,5 % der Schwangerschaften vorliegenden befundeten Schwangerschaftsrisiken wie Plazentainsuffizienz, vorzeitige Wehen, Gestationsdiabetes und Hyperemesis rechtzeitig in Bezug zu einer Flugreise abzuwägen [7]. Ein ärztliches Attest darf zur Zeit bis zu sieben Tage vor Flugantritt ausgestellt werden. Innerhalb dieses Zeitraumes kann sich an dem vom behandelnden Gynäkologen erhobenen Befund Grundlegendes ändern. Daher sollte das Attest möglichst nicht älter als zwei Tage sein, um einigermaßen den Anspruch an Aktualität zu haben.

Generell ist eine Einteilung der Fluggesellschaften in Einlings- und Mehrlingsschwangerschaften sowie in Langstrecken- und Kurzstreckenflüge obligat. Nach unseren Recherchen unterscheidet mittlerweile keine der großen deutschen Fluggesellschaften mehr nach diesem Gesichtspunkt. Einlingsschwangerschaften kommen mit 98,1 % zwar deutlich häufiger vor als Mehrlingsschwangerschaften. Diese gehen allerdings

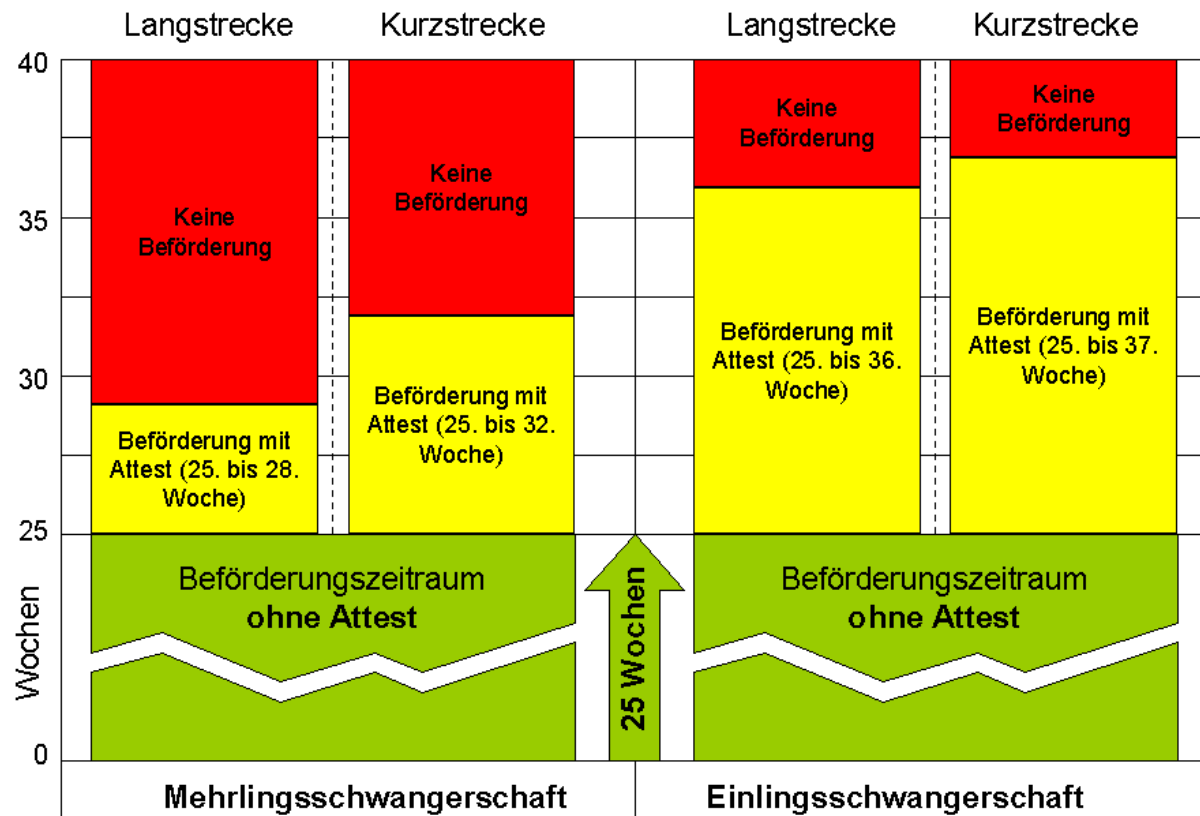


Abbildung 4.1: Empfehlung zur Beförderung schwangerer Passagiere

eher mit Komplikationen gegen Ende der Schwangerschaft sowie mit verkürzter Schwangerschaftsdauer einher. Für Frauen mit Mehrlingsschwangerschaft lautet die Empfehlung daher, Langstreckenflüge bis zur 28. Schwangerschaftswoche und Kurzstreckenflüge bis zur 32. Schwangerschaftswoche zu unternehmen, wobei Kurzstreckenflüge als Flüge definiert werden sollten, bei denen es innerhalb einer Stunde möglich ist, einen Flughafen anzufliegen. Bei den in 2004 in Bayern [7] registrierten 70,4 % Entbindungen am Termin oder mit Frühgeburtsbestrebungen betrug bei 12,6 % der schwangeren Frauen die Geburtsdauer zwischen ein und zwei Stunden, bei 43,9 % zwischen 3 und 6 Stunden und bei 22,5 % zwischen 7 und 11 Stunden, so dass im Falle eines sehr unwahrscheinlichen Geburtsbeginns im Flugzeug davon auszugehen wäre, dass genügend Zeit bestünde, den nächsten Flughafen anzufliegen. Die Empfehlung für Frauen mit Einlingsschwangerschaft sollte für Langstreckenflüge bis zur 36. Schwangerschaftswoche und für Kurzstreckenflüge bis zur 37. Schwangerschaftswoche gehen. Als Grundlage der Empfehlung des Beförderungszeitraumes für schwangere Passagiere in der zivilen Luftfahrt können auch nachfolgende Zahlen zum Gestationsalter gesehen werden. 91,1 % der Neugeborenen kommen zwischen 37. und 41. Schwangerschaftswoche zur Welt, 6,6 % zwischen 32. und 36. Schwangerschaftswoche, nur noch 0,8 % zwischen 27. und 31. Schwangerschaftswoche bzw.

0,3 % unter der 27. Schwangerschaftswoche [7]. Diese Zahlen zu Geburten stehen exemplarisch für Deutschland und stützen unsere Empfehlung zur Beförderung Schwangerer in der zivilen Luftfahrt.

Unverständlicherweise sehen sich schwangere Passagiere, je nach Fluggesellschaft, immer noch unterschiedlichen Beförderungsrichtlinien gegenüber. Im Hinblick auf zahlreiche veröffentlichte Untersuchungen zu Physiologie bzw. Pathophysiologie Schwangerer und ihrer Feten bei kurzfristiger passiver Höhenexposition bei Flügen in der zivilen Luftfahrt, sind diese unterschiedlichen Regelungen aus wissenschaftlicher Sicht nicht nachvollziehbar. Es konnte gezeigt werden, dass Flugreisen bei gesunden Schwangeren keinen geburtsfördernden Charakter haben und auch der eventuell mögliche psychische Stress der Schwangeren bei Flugreisen keine Auswirkung auf Frühgeburtsbestrebungen hat [9,12,20,27].

Bedauerlicherweise war der Rücklauf unserer Fragebogenaktion nicht so ergiebig wie erhofft. Es scheint, als wären weniger als die Hälfte der angeschriebenen Fluggesellschaften daran interessiert, ihren Umgang mit Schwangeren transparent zu machen. Dies könnte einerseits so gewertet werden, als wolle man „seine Richtlinien“, da nicht plausibel, nicht mitteilen um keine Begründung liefern zu müssen. Andererseits könnte man zu der Auffassung kommen, dass kein ernsthaftes Interesse daran besteht, in Zeiten der Globalisierung, eine Vereinheitlichung der vielfältigen Bestimmungen anzustreben.

Damit schätzen wir die Bereitschaft der Fluggesellschaften, die Vielzahl an Beförderungsbestimmungen für schwangere Passagiere zeitgemäß zu vereinheitlichen als relativ gering und unwahrscheinlich ein.

Einheitliche und zentral abfragbare Richtlinien zur Beförderung schwangerer Passagiere auf deutschen Airlines wären sicherlich im Interesse aller, die täglich Umgang mit dem Thema Fliegen in der Schwangerschaft haben. Eine solch eindeutige Regelung würde auch dazu beitragen, der Absicherung der jeweiligen Airline im Umgang mit Schwangeren wie auch dem Sicherheitsbedürfnis jeder fliegenden Schwangeren gerecht zu werden. Um Transparenz und Sicherheit für schwangere Passagiere und Fluggesellschaften zu erreichen, ist eine Neuerung und Vereinheitlichung der teilweise schon seit einigen Jahrzehnten bestehenden divergenten Beförderungsbestimmungen auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse wünschenswert.

5 Zusammenfassung

Werdende Mütter verreisen immer häufiger mit dem Flugzeug. Sei es zu privaten Zwecken oder aus geschäftlichen Gründen. Die Vielzahl an Beförderungsrichtlinien, eventuell kombiniert mit Attestbestimmungen oder Ausnahmen in Form von Gutachten eines Fliegerarztes, bedingen oftmals Verunsicherungen bei den schwangeren Passagieren. Die sich häufig wandelnde Struktur innerhalb der deutschen Fluggesellschaften, wie erst Anfang 2007 wieder geschehen, erschweren eine Transparenz der Beförderungsbestimmungen für Laien erheblich.

Auf Grundlagen der physiologischen Kenntnisse zum Thema Fliegen in der Schwangerschaft wurde eine einheitliche Empfehlung zur Beförderung schwangerer Passagiere in der zivilen Luftfahrt erarbeitet. Diese Empfehlung sieht als Grundlage eine generelle Attestpflicht für Schwangere jenseits der 25. Schwangerschaftswoche vor. Zudem ist eine Unterteilung in Einlings- und Mehrlingsschwangerschaft sowie Kurz- und Langstreckenflug unerlässlich. Diese Empfehlung sieht vor, Mütter mit Einlingsschwangerschaft auf Langstrecken bis zur 36. Schwangerschaftswoche und auf Kurzstrecken bis zur 37. Schwangerschaftswoche zu befördern. Für Mütter mit Mehrlingsschwangerschaft gelten kürzere Beförderungszeiten. Sie sollen auf Langstrecken bis zur 28. Schwangerschaftswoche und auf Kurzstrecken bis zur 32. Schwangerschaftswoche befördert werden.

Für gelegentlich fliegende gesunde Schwangere sind bei komplikationslosen Schwangerschaften keine Risiken für die Ungeborenen im Hinblick auf hypoxische Ereignisse, Frühgeburtsbestrebungen oder Strahlung zu erwarten.

Eine Vereinheitlichung der aktuell existierenden verschiedenen Beförderungsbestimmungen der deutschen Fluggesellschaften wäre für alle, die sich mit diesem Thema beschäftigen, zeitgemäß und wünschenswert.

6 Anhang

I. Richtlinien für schwangere Passagiere

1. Gibt es bei ihrer Fluggesellschaft Beförderungsbeschränkungen für schwangere Passagiere?
☐ *Nein* ☐ *Ja*

2. Beförderung schwangerer Passagiere erfolgt bis zur ____ SSW.

3. Bei Mehrlingsschwangerschaften erfolgen diese bis zur ____ SSW.

4. Ist ein ärztliches Attest erforderlich?

☐ *Nie* ☐ *Immer* ☐ *Ab der ____ SSW*

5. Seit wann bestehen diese Richtlinien ihrer Fluggesellschaft zur Beförderung Schwangerer?

☐ *Seit Bestehen der Fluggesellschaft - seit _____*

II. Richtlinien für schwangere Flugbegleiterinnen und Pilotinnen

1. Gibt es Beschränkungen für die Arbeit in der Luft?
☐ *Nein* ☐ *Ja*

2. Arbeit in der Luft wird bis zur ____ SSW genehmigt.

III. Beförderung Schwangerer Passagiere

1. Wie hoch ist der geschätzte prozentuale Anteil der schwangeren Flugreisenden bezogen auf alle beförderten Flugreisenden ihrer Fluggesellschaft pro Jahr?
☐ *< 0,1%* ☐ *0,1% < 1%* ☐ *1% < 5%* ☐ *5% < 15%* ☐ *>15%*

Abbildung 6.1: Fragebogen

IV. Geburten im Flugzeug

1. Gab es Geburten an Bord eines Flugzeuges ihrer Fluggesellschaft?

☐ *Nein* ☐ *Ja*

Falls Ja, Anzahl der Geburten insgesamt ____ im Zeitraum von ____ bis ____ .

2. Gibt es nähere Angaben zu den Geburten?

☐ *Nein* ☐ *Ja*

V. Vorkehrungen für geburtshilfliche Notfälle im Flugzeug

1. Sehen Sie Schulungen des Personals für Geburten und geburtshilfliche Notfälle im Flugzeug vor?

☐ *Nein* ☐ *Ja*

2. Welche Häufigkeit haben diese Schulungen?
-

3. Ist ein Notfallkoffer für Geburten an Bord jedes Flugzeuges?

☐ *Nein* ☐ *Ja*

VI. Kosmische Strahlung

1. Existiert ein Frühwarnsystem für kurzfristige deutliche Erhöhung kosmischer Strahlung (Solar Flares)?

☐ *Nein* ☐ *Ja*

2. Kam es in der Vergangenheit zu Änderungen von Flugroute und Flughöhe wegen extrem erhöhten Werten kosmischer Strahlung?

☐ *Nein* ☐ *Ja*

Abbildung 6.2: Fragebogen

7 Literatur

- 1 American College of Obstetricians and Gynaecologists, Committee on Obstetric Practice. ACOG committee opinion. Air travel during pregnancy. Am J Obstet Gynecol 1995; 172:1178-80
- 2 Arroyo MA, Delany J, Welch R. Normal lung function assessment during pregnancy. J Obstet Gynaecol 1999; 19(1):43
- 3 Artal R, Fortunato V, Welton A, Constantino N, Khodiguian N, Villabos L, Wiswell R. A comparison of cardiopulmonary adaptations to exercise in pregnancy at sea level and altitude. Am J Obstet Gynecol 1995; 172:1170-80
- 4 Barish RJ. In-Flight Radiation Exposure During Pregnancy. Am J Obstet Gynecol. 2004 June; Vol. 103:1326-30
- 5 Baumann H, Bung P, Fallenstein F, Huch A, Huch R. Reaktion von Mutter und Fet auf die körperliche Belastung in der Höhe. Geburtsh. u. Frauenheilk. 1985; 45:869-76
- 6 Baumann H, Huch R. Höhenexposition und Höhengaufenthalt in der Schwangerschaft: Auswirkungen auf Mutter und Fet. Zent. bl. Gynäkol. 1986; 108:889-99
- 7 Bayerische Arbeitsgemeinschaft für Qualitätssicherung in der stationären Versorgung. Geburtshilfe, Modul 16/1; Westenriederstr. 19, München
- 8 Bezrruchka S. High altitude medicine. Med Clin North Am 1992; 76:1481-97
- 9 Breathnach F, Geoghean T, Daly S, Turner MJ. Air Travel in Pregnancy: The „Air-borne“ Study. Ir Med J 2004 June; 97(6):167-8
- 10 Bührle E, Gabler A. Notfallmedizin im Flugzeug - Erste Hilfe über den Wolken. Dt. Ärzteblatt; Jg. 102, Heft 6; Feb 2005; A 338-342

- 11 Coker RK, Patridge MR; Assessing the risk of hypoxia in flight: the need of more rational guidelines; *European Respiratory Journal* 2000; 15:128-30
- 12 Connor SB, Lyons TJ. US: Air Force aeromedical evacuation of obstetric patients in Europe. *Aviat Space Environ Med* 1995; 66:1090-3
- 13 Cottrell JJ. Altitude exposure during aircraft flight: flying higher. *Chest* 1992; 92:81-4
- 14 Cüppers S. Die geschichtliche Entwicklung der Höhenphysiologie und ihre Bedeutung für die Luftfahrtmedizin bis 1961. Verlag Shaker, Aachen 1994; S.1-26
- 15 Daniell WE, Vaughan TL, Millies BA. Pregnancy outcome among female flight attendants. *Aviat Space Environ Med* 1990; 61:840-4
- 16 DeHart RL. Fundamentals of Aerospace Medicine. Lea & Febinger, Philadelphia 1985; p. 3-59, 559-580
- 17 Draeger J, Kriebel (Hrsg.). Praktische Flugmedizin. Landsberg/Lech 2002; S. 1-104
- 18 Drinkwater BL, Kramar PO, Bedi JF, Folinsbee LJ. *Aviat Space Environ Med* 1982; 53(5):472-7
- 19 Ferrari E et al. Travel as a risk factor for thromboembolic disease. *Chest* 1999; 115:440-4
- 20 Freeman M, Ghidini A, Spong CY, Tchabo N, Bannon PZ, Pezzullo JC. Does air travel affect pregnancy outcome? *Arch Gynecol Obstet* 2004; 269:274-7
- 21 Gallus AS. Travel, venous thromboembolism, and thrombophilia. *Semin Thromb Hemost*; 2005 Feb; 31(1):90-6
- 22 Gendreau MA, De John C. Responding to medical events during commercial airline flights. *N Engl J Med* 2002; 346:1067-1073

-
- 23 Goodwin T. In-flight medical emergencies: an overview.
BMJ 2000; 321:1338-1341
- 24 Grossmann K. Flugmedizin - Leitfaden für die Praxis.
Deutscher Ärzteverlag, Köln 1985; S.13-44, 77
- 25 GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH; Neuherberg.
Fortbildungsunterlagen Spezialkurs im Strahlenschutz für Ärzte
- 26 Herold G (Hrsg.). Innere Medizin. Köln; 1997; S. 19-24
- 27 Huch R, Baumann H, Fallenstein F, Schneider KTM, Holdener F,
Huch A. Physiologic changes in pregnant women and their fetuses
during jet air travelling. Am J Obstet Gynecol 1986; 154:996-1000
- 28 Humphreys S, Deyermund R, Bali I, Stevenson M, Fee JP.
The effect of high altitude commercial air travel on oxygen saturation.
Anaesthesia 2005; 60:458-60
- 29 Kametas N, McAuliffe F, Krampfl E, Chambers J, Nicolaides K.
Maternal cardiac function during pregnancy at high altitude.
Br J Obstet Gynaecol 2004 October; Vol; 111:1051-8
- 30 Kröger E, Küpper Th, Rieke B, Gieseler U. „CRM-Handbuch;
Reisen mit Vorerkrankungen“;.CRM Centrum für Reisemedizin
Düsseldorf 2006; S.79-81, 129-138
- 31 Laciaga P, Koller EA. Respiratory, circulatory,
and ECG changes during acute exposure to high altitude.
J Appl Physiol 1976; 41(2):159-67
- 32 Lindqvist P, Dahlback B, Marsal K. Thrombotic risk during pregnancy:
a population study. Obstet Gynecol 1999; 94:595-99
- 33 Mahony PH. Inflight medical incidents: implications for cabin safety.
International Aircraft Cabin Safety Symposium, Vancouver 2004

- 34 Matzkel A, Lurie S, Elchalal U, Blickstein I.
Placental abruption associated with air travel;
A case report and an overview on safety of air travel in pregnant women.
J Perinat Med 1991; 19:317-20
- 35 McAuliffe F, Kametas N, Espinoza J, Greenough A, Nicolaides K.
Respiratory function in pregnancy at sea level and at high altitude.
Br J Obstet Gynaecol 2004 April; Vol. 111:311-5
- 36 McAuliffe F, Kametas N, Krampfl E, Ernesting J, Nicolaides K.
Blood gases in pregnancy at sea level and at high altitude.
Br J Obstet Gynaecol 2001; 108:980-5
- 37 Medical Guidelines for Air Travel.
Air Transport Medicine Committee, Aerospace Medical Association.
Aviat Space Environ Med 1996; 67(10,Suppl.):B1-16
- 38 Medical oxygen and air travel. AMA Council on Scientific Affairs.
Aviat Space Environ Med 2000; 71:827-31
- 39 Mezger N, Chappuis F, Loutan L. Travelling when pregnant?
Possible, but ... Rev Med Suisse 2005 May 11; 1(19):1263-6
- 40 Mortazavi A, Eisenberg MJ, Langleben D, Ernst P, Schiff RL.
Altitude-Related Hypoxia: Risk Assessment for Passengers on Commercial
Aircraft. Aviat Space Environ Med 2003 Sept; 74(9):922-7
- 41 Muhm M. Predicted Arterial Oxygenation at Commercial Aircraft
Cabin Altitudes. Aviat Space Environ Med 2004 Oct; 75(10):905-12
- 42 Newlands JC, Barclay JR. Air transport of passengers of advanced
gestational age. Aviat Space Environ Med 2000 Aug; 71(8):839-42
- 43 Parer JT. Effects of hypoxia on the mother and fetus with emphasis
on maternal air transport. Am J Obstet Gynecol 1982; 142:957-61
- 44 Pschyrembel, Klinisches Wörterbuch; 257. neu bearbeitete Auflage.
Berlin; New York: de Gruyter 1994; S.582

- 45 Rayman RB. Passenger safety, health, and comfort a review.
Aviat Space Environ Med 1997; 68:432-40
- 46 Saito S, Tanobe K, Yamada M, Nishihara F. Relationship between
arterial oxygen saturation and heart rate variability at high altitudes.
Am J Emerg Med 2005; 23:8-12
- 47 Schmitt RF, Thews G (Hrsg.). Physiologie des Menschen.
Springer Verlag, Heidelberg 1990; 24.Auflage; S. 574-631, 703-711
- 48 Scholten P. Pregnant stewardess-should she fly?
Aviat Space Environ Med 1976; 47:77-81
- 49 Vintzileos AM, Nioka S, Lake M, Li P, Luo Q, Chance B.
Transabdominal fetal pulse oximetry with near-Infrared spectroscopy.
Am J Obstet Gynecol 2005; 192:129-33
- 50 Wulf H. Der Gasaustausch in der reifen Plazenta des Menschen.
Kiel 1960; S. 10-31
- 51 Zeeck A. Chemie für Mediziner. -2.Auflage- München; Wien; Baltimore:
Urban und Schwarzenberg, 1992; S.140
- 52 <http://www.airberlin.com>
- 53 <http://www.capitura.de>
- 54 <http://www.condor.com>
- 55 <http://www.european-air-express.de>
- 56 <http://www.flugmed.de>. flugmed.org/reisemedizin;
Deutsche Akademie für Flug- und Reisemedizin
- 57 <http://www.flyaeroflight.de>
- 58 <http://www.flydba.com>

-
- 59 <http://www.gesundes-reisen.de/news/aktuell;>
Reisen in der Schwangerschaft
- 60 <http://www.gexx.de>
- 61 <http://www.germanwings.com>
- 62 <http://www.hapag-lloyd.de>
- 63 <http://www.hlx.com>
- 64 <http://www.iata.org>; IATA Inflight services
- 65 <http://www.krankenkassenratgeber.de>
- 66 <http://www.LTU.de>
- 67 <http://www.ryanair.de>
- 68 <http://www.who.int.who.int>; International travel and health;
Travel by air: health considerations

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau der Atmosphäre [n. 16]	3
2.2	2. Gesetz von Gay-Lussac	5
2.3	Internationale Standardatmosphäre - ISAO [17]	7
2.4	Höhe - Luftdruck [16]	9
2.5	Lungenvolumina und -kapazitäten [47]	11
2.6	Alveoläre Partialdrücke in Abhängigkeit zur alveolären Ventilation [47] .	15
2.7	O_2 -Partialdruckzunahme im Erythrozyten während der Passage durch die Lungenkapillare [47]	16
2.8	Schematische Darstellung eines Hämoglobinmoleküls (li.) [51]; Struktur des Häm mit den zusätzlichen Liganden im Hämoglobin (re.) [44]	19
2.9	O_2 -Bindungskurve des Erwachsenen [n.47]	21
2.10	Abhängigkeit der O_2 -Bindungskurve von der Temperatur [n. 47]	23
2.11	Abhängigkeit der O_2 -Bindungskurve vom pH-Wert [n. 47]	24
2.12	Höhenzonen [n.47]	26
2.13	Abhängigkeit von Atemzeitvolumen ($\dot{V}E$) zu arteriellem O_2 -Partialdruck (PaO_2) [n. 47]	28
2.14	Beförderungsrichtlinien großer deutscher Fluggesellschaften	33
2.15	Attestrichtlinien großer deutscher Fluggesellschaften	34
2.16	O_2 -Bindungskurve auf Meereshöhe [n. 16]	36
2.17	O_2 -Bindungskurve in 3.048 m [n. 16]	36
2.18	Baseline der mittleren fetalen HF (n. 27)	43
2.19	Mittlere effektive jährliche Äquivalentdosen der Strahlung in westlichen Industrienationen, angegeben in mSv [n.25]	56
4.1	Empfehlung zur Beförderung schwangerer Passagiere	66
6.1	Fragebogen	69
6.2	Fragebogen	70

Lebenslauf

Anne Marie Gräfin von Schwerin

Angaben zur Person

Geburtsdatum: 22.01.1970
Geburtsort: München
Familienstand: verheiratet, drei Kinder
Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung

09.1999 - 11.2000 Praktisches Jahr in Ruit
Innere Medizin, Chirurgie, Gynäkologie

11.2000 Universität Tübingen
3. Staatsexamen - Abschluss Studium der Humanmedizin an der Universität Tübingen

04.1993 - 10.1999 Universität Ulm
Studium der Humanmedizin

11.1992 - 03.1993 Universität Marburg
Studium der Humanmedizin

04.1991 - 09.1993 LMU München
Studium der Germanistik und Kommunikationswissenschaften

09.1989 - 03.1990 Praktikum Deutsche Bank Paris

09.1976 - 07.1989 Schulausbildung Gräfelfing/München
Erwerb der Allgemeinen Hochschulreife am Prof. Kurt-Huber-Gymnasium Gräfelfing

Sprachkenntnisse

Französisch (fließend in Wort und Schrift), Englisch (gut), Spanisch (Grundlagen)

Hobbys und Besondere Interessen

Mountainbiken, Tennis, Wandern, Fotografie, Klavier, Kunst, Oper und Operetten